



Modélisation du manteau neigeux et applications dans les domaines du changement climatique et de l'hydrologie

Eric Martin

► To cite this version:

Eric Martin. Modélisation du manteau neigeux et applications dans les domaines du changement climatique et de l'hydrologie. Hydrologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2005. tel-00216129

HAL Id: tel-00216129

<https://theses.hal.science/tel-00216129>

Submitted on 24 Jan 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MEMOIRE DE RECHERCHE

Présenté par

Eric Martin

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Météo-France, CNRM/GAME, URA CNRS1357

Pour obtenir le diplôme

D'habilitation à diriger des recherches
De l'Université Paul Sabatier, Toulouse

Spécialité : physique de l'atmosphère

Modélisation du manteau neigeux et applications dans les domaines du changement climatique et de l'hydrologie

Soutenu le 21 septembre 2005 devant le jury composé de :

M. Serge Chauzy	Président
M. Martin Beniston	Rapporteur
M. Michiel van den Broeke	Rapporteur
M. Pierre Ribstein	Rapporteur
M. Michel Fily	Examineur
M. Joël Noilhan	Directeur de thèse

Centre national de recherches météorologiques
42, avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse CEDEX

Sommaire

Curriculum Vitae	5
Rapport sur les travaux scientifiques	7
1 Introduction.....	9
2 La modélisation du manteau neigeux :	13
2.1 Validation du modèle CROCUS	13
2.2 La place des flux turbulents dans le bilan énergétique de surface	17
2.3 Vers une intercomparaison des modèles de neige	20
2.4 L'intercomparaison des modèles de neige SnowMIP	24
2.5 Développement du couplage CROCUS-ISBA Routes	26
3 Applications dans le domaine du climat	29
3.1 Les travaux sur la sensibilité climatique et la méthode de régionalisation.....	29
3.2 Etudes de simulations climatiques du climat présent et des réanalyses ERA15 et ERA40	30
3.3 Un couplage expérimental de CROCUS avec le modèle ARPEGE	34
3.4 Test de CROCUS en conditions polaires	35
3.5 Impact d'un changement climatique sur le risque d'avalanche.....	37
4 Applications dans le domaine de l'hydrologie	41
4.1 Le projet Sarennes	42
4.2 L'étude sur le bassin du Rhône	47
5 Conclusion et perspectives	53
6 Bibliographie.....	59
Publications et travaux scientifiques	63
1 Publications	65
1.1 Publications dans des revues à comité de lecture	65
1.2 Communication à des congrès (invitation)	67
1.3 Communication à des congrès (comité de sélection)	67
1.4 Contribution à des ouvrages collectifs.....	68
1.5 Textes de vulgarisation ou valorisation	69
1.6 Mémoires ayant permis la soutenance de diplômes	70
1.7 Rapports de fin de contrat	71
1.8 Notes du Centre d'études de la neige	71
2 Activités d'enseignement, encadrement et communauté scientifique.....	73
2.1 Enseignement.....	73
2.2 Encadrement (thèses)	73
2.3 Encadrement (autre).....	73
2.4 Programmes de coopération	73
2.5 Organisation de colloques/congrès, édition	74
2.6 Participation à des jurys de thèse (hors des thèses encadrées)	74
2.7 Animation scientifique.....	74
Sélection d'articles	77

Table des figures

Figure 1 : Schéma de principe du modèle CROCUS.	15
Figure 2 : Comparaison entre hauteur de neige simulée et mesurée à La Clusaz (d'après Martin et al, 1994)	18
Figure 3 : Variations du coefficient d'échanges C en fonction du vent (d'après Martin et Lejeune, 1998).....	19
Figure 4 : Schéma du couplage avec les couches de sol pour CIRSE (Etchevers et Martin, 1997)	21
Figure 5: Expérience PILPS 2(d) : corrélation entre le cumul d'eau liquide regelée dans le manteau neigeux à partir du 1 ^{er} février et le décalage (en jours) de la date de disparition du manteau neigeux entre CIRSE et ISBA-D95 (Etchevers et Martin, 1997).	23
Figure 6: Moyennes mensuelles de 1966 à 1983 de l'équivalent en eau des modèles participant à PILPS 2(d). Les courbes correspondant à ISBA-D95 et CIRSE sont en traits épais, les points correspondent aux observations (Etchevers, 2000).....	23
Figure 7 : Equivalent en eau du manteau neigeux simulé par les modèles de SnowMIP pour la saison 1997/98 du site du Col de Porte. Les observations d'équivalent en eau sont représentées par les points.	25
Figure 8 : Albédo simulé par les modèles de SnowMIP pendant la période de fonte pour le site du Weissfluhjoch (15 avril au 20 juin 1993).	26
Figure 9 : Planches expérimentales de chaussées sur le site du Col de Porte, avec mesures de hauteur de neige, et caméras vidéo.	27
Figure 10 : Haut : Comparaison des données simulées (—) et mesurées (---) de hauteur de neige, avec la hauteur de la couche de neige saturée (—). Les flèches indiquent les déneigements manuels. Bas : température de surface de la route simulée (—) et mesurée (---) (Bouilloud et Martin, 2005).....	28
Figure 11 : Rose du vent géostrophique à 700 hPa (novembre mars) pour le point 45°N, 6°E. De gauche à droite : CEPMMT, CNRM, MPI, UKMO. Les classes de vitesse sont 0-5 m s ⁻¹ , 5-10 m s ⁻¹ , >10 m s ⁻¹ . (Déqué et al, 1998).....	31
Figure 12 : Hauteur de neige moyenne simulée par la méthode de régionalisation par analogues pour les simulations haute résolution : CNRM (cnr), MPI (mpi) et UKMO (ukm) (Déqué et al, 1998)	31
Figure 13 : Relief du modèle dans les réanalyses ERA15 (gauche) et ERA40 (droite) (Martin, 2004).....	32
Figure 14 : Comparaison entre l'équivalent en eau simulé par ERA40 (point 46°N, 7°E, 1100 m) et l'analyse SAFRAN-CROCUS pour le massif du Beaufortain (900 m) (Martin, 2004).	33
Figure 15 : Profils de densité (a), taille de grains (b), sphéricité des grains (c) pour les simulations F (densité de neige fraîche corrigée) et G (simulation F, avec un cycle de 4 ans sur les précipitations : précipitations multipliées par 1 la première année, puis 0.5, 2 et 0.5). (Dang et al, 1997)	36
Figure 16 : Taille maximale des grains (mm) sur les 2 premiers mètres du manteau neigeux. A gauche : forçage 90/91 de l'archive du modèle opérationnel du CEPMMT, à droite, forçage à partir des réanalyses ERA15 (Genthon et al, 1998).	36
Figure 17 : Moyenne décadaire de l'indice d'activité avalancheuse sur 15 ans dans le massif du Mont-Blanc pour la simulation de référence et les scénarios PT et T. a) indice complet, b) indice correspondant aux avalanches de neige récente, c) indice correspondant aux avalanches de fonte (Martin et al, 2001)..	39
Figure 18 : Bassin versant de Sarennes : réseau hydrographique, sous-bassins et distance à l'exutoire (Martin et al, 1997)	42
Figure 19 : Découpage en pente/ exposition pour chaque altitude utilisé pour forcer le modèle MODCOU	43
Figure 20 : Bilan de masse simulé du glacier de Sarennes (été 1981 à fin 1995). La glace est représentée en bleu, la neige saisonnière en jaune. Les barres horizontales correspondent aux mesures : limite de la neige et de la glace (traits continus) et maximum d'accumulation (traits pointillés) (Martin et al, 1997).	44
Figure 21 : Relation écoulement moyen / débit moyen pour les 34 épisodes retenus. Ecoulement : pluie + fonte du manteau neigeux. Débit : débit à l'exutoire (Sarennes-les-Moulins) (Martin et al, 1997). Sont indiquées sur la figure les interprétations tirées de l'analyse complète des données.....	45
Figure 22 : Débit mensuel (m ³ s ⁻¹) de la rivière Sarennes. En haut : chronique observée, milieu : chronique reconstituée par SAFRAN-CROCUS-MODCOU, bas : scénario « sans neige ». Trait gras : débit moyen. Autres traits (de haut en bas) : débit dépassé une année sur dix, une année sur cinq, puis symétrique pour les deux courbes du dessous (Martin et al, 1997).	46

Figure 23: Débit quotidien de la Durance à La Clapière et deux stations de mesures intermédiaires (1985/1986). Observation et simulation pour des mailles de 1 et 8 km de côté (Etchevers et al, 2001).....	49
Figure 24 : Evolution du manteau neigeux et débits moyens mensuels sur les bassins de l'Isère à Saint Gervais le Port et la Durance à la Clapière. Obs : observation (débits seulement), PC : climat actuel, le reste : six scénarios climatiques. A noter que pour le bassin de l'Isère, la simulation de référence est très éloignée de l'observation, en raison de la présence de nombreux barrages.....	52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Les 4 paramétrisations du manteau neigeux utilisées par Météo-France.....	14
Tableau 2 : Description de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA.....	16
Tableau 3 : nombre d'occurrences d'hiver avec une hauteur de neige maximale dans une tranche donnée (au total 9 hivers) pour le massif du Mont-Blanc. Référence : simulation SAFRAN-CROCUS sur la période 81-90 (d'après Martin et al, 1998).	32
Tableau 4 : anomalies (relatives au climat actuel, en %) des précipitations totales (PT) et solides (PS) pour les mois de décembre, janvier, février et mars sur les bassins versants de l'Isère et de la Haute Durance.	50
Tableau 5 : évolution du débit annuel moyen par rapport au climat actuel (%).	51

Curriculum Vitae

Eric Martin, né le 31/07/64

Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées (Ex ingénieur de la Météorologie)

Formation

- 1982 BAC C, mention AB
- 1982/1984 Classes préparatoires, Lycée Thiers, Marseille
- 1984/1987 Scolarité ingénieur des travaux de la Météorologie (Ecole nationale de la Météorologie).
- 1987/1988 DEA « Mécanique des milieux géophysiques et environnement », Université Joseph Fourier
- 1990/1992 Scolarité "Ingénieur de la Météorologie" à l'Ecole nationale de la Météorologie et DEA Océan, atmosphère, biosphère, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 1992/1994 Formation complémentaire par la recherche au Centre national de recherches météorologiques, Centre d'études de la neige.

Expérience professionnelle

- 1988-1990 Adjoint au chef du bureau des affaires militaires et de défense de la direction de la Météorologie nationale.
- 1994-1997 Affectation au Centre d'études de la neige (CEN), unité de recherche du CNRM, chef de l'équipe physique du manteau neigeux et modélisation (MANTO).
- 1998-2004 Chef du Centre d'études de la neige
- 2004- Chercheur dans l'équipe MC2 du Groupe de modélisation à moyenne échelle (MC2) du CNRM

Diplômes

- 1982 Bac C
- 1987 Ingénieur de l'Ecole nationale de la Météorologie
- 1988 DEA mécanique des milieux géophysiques et environnement, Université Joseph Fourier, Grenoble
- 1992 DEA, Océan, atmosphère, biosphère, Université Paul Sabatier, Toulouse
- 1992 Ingénieur civil de la Météorologie
- 1995 Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier

Sujets des stages, thèse

- 1987 Stage de fin d'études : « Validation d'un modèle d'évolution énergétique du manteau neigeux » (Ecole nationale de la Météorologie).
- 1988 Stage de DEA « Etude expérimentale des flux de chaleur au-dessus de la neige » (Université Joseph Fourier, Grenoble)
- 1992 Stage de DEA et fin d'études ENM « Etude de la sensibilité du manteau neigeux aux variations possibles du climat » (Université Paul Sabatier, Toulouse et Ecole nationale de la Météorologie)
- 1995 Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier « Modélisation de la climatologie nivale des Alpes françaises, application des techniques de régionalisation à l'étude de l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement ».

Organigramme simplifié du CNRM

CNRM : Centre national de recherches météorologiques - Direction - Services communs	
<i>Unités de recherche</i>	
CEN : Centre d'études de la neige	<i>Equipes de recherches au sein des unités</i> M&M : météo et montagne MANTO : physique du manteau neigeux et modélisation AVAL : avalanches ITAO : informatique, télécommunications, applications opérationnelles LIEN : laboratoire d'instrumentation pour l'étude de la neige
GMME : Groupe de météorologie à moyenne échelle	MATIS : méthodes appliquées à la télédétection pour l'interprétation des surfaces MC2 : modélisation à moyenne échelle MésoNH : équipe Méso-NH MICADO : modélisation et initialisation de la convection par assimilation de données d'observations MOANA : modélisation de l'atmosphère nuageuse et analyse TURBAU : turbulence, brouillard et atmosphère urbaine
GMGEC : groupe de météorologie à grande échelle et climat	EAC : équipe Arpège climat CAIAC : chimie atmosphérique : interaction avec le climat CARMA : chimie atmosphérique : recherche en modélisation et assimilation MEMO : modélisation des échanges météo-océaniques UDC : unité dynamique du climat
GMEI : Groupe de météorologie expérimentale et instrumentale	LISA : lidar satellite 4M : moyens mobiles de mesures météorologiques MNPCA : microphysique des nuages et physico-chimie de l'atmosphère SPEA : simulation physique des écoulements atmosphériques STM : radar strato-troposphérique météorologique TRAMM : traitement et analyses de mesures météorologiques
GMAP : Groupe de modélisation pour l'assimilation et la prévision	ALGO : algorithmique COOPE : coopérations OBS : observations PROC : processus RECYF : recherche et expérience sur les cyclogénèses et les fronts
CMM : Centre de météorologie marine	
CAM : Centre d'aviation météorologique	INS : instrumentation ITD : informatique, traitement des données OPS : opérations MNE : modélisation numérique des écoulements
RETIC : Réseau d'études et de transfert interne de connaissance	

Rapport sur les travaux scientifiques

1 Introduction

Mes travaux de recherche ont eu pour objectif principal la modélisation du manteau neigeux et ses applications dans différents domaines, allant de l'application des modèles de neige à des conditions climatiques nouvelles, aux études d'impact des changements climatiques et aux études hydrologiques.

Ces travaux se sont concentrés dans un premier temps sur la modélisation détaillée du manteau neigeux et de ses interactions avec l'atmosphère, puis ont progressivement évolué vers des applications en hydrologie et à l'étude de l'impact climatique, en parallèle de la poursuite des actions liées au développement de la modélisation du manteau neigeux.

La neige, milieu familier, est extrêmement complexe. Elle est composée de glace, de vapeur d'eau, d'air, parfois d'eau liquide et d'autres composés en petites quantités. Ces derniers peuvent jouer sur son évolution, comme les particules de carbone-suie, qui influencent l'albédo dans le domaine visible. Elle peut être vue comme un assemblage de grains de neige (métamorphose des flocons initiaux), dont la forme, l'assemblage et les propriétés mécaniques évoluent sans cesse. Ce matériau peut aussi être considéré comme un empilement de couches de neige ayant des propriétés homogènes. Une couche de neige, correspondant souvent à une chute de neige, peut être reconnaissable très longtemps en faisant une coupe du manteau neigeux sur le terrain.



Différentes approches de la neige

La neige (ce rapport n'abordera pratiquement exclusivement que la neige saisonnière) est un facteur important du climat. Tout d'abord, elle constitue une réserve d'eau importante qui est libérée pendant la période de fonte. Cette fonction de stockage est amplifiée par le fait qu'il n'y a pratiquement pas d'évaporation ou de sublimation au-dessus de la neige. En deuxième lieu, la neige est un excellent isolant thermique capable de découpler l'évolution du sol sous-jacent de l'atmosphère au-dessus. Enfin, le fort albédo de la neige et son caractère peu rugueux (ne favorisant pas les échanges turbulents avec l'atmosphère) modifient profondément les échanges sol-atmosphère. Ainsi, en présence de neige, et « toutes choses égales par ailleurs », la température de l'air près du sol est abaissée de quelques degrés.

Hindustan Times

New Delhi, Tuesday, February 22, 2005  www.hindustantimes.com Metro Rs 1.50

Over 200 dead, houses buried

**Rashid Ahmad and
Rashpal Dasgotra**
Srinagar/Udhampur, Feb 21

THE SUN finally came out, but the damage has been done. At least 200 people are reported to have died and hundreds gone missing in avalanches and landslides across the Valley.

Sources said around 2,000 houses had been completely or partially destroyed in the snowfall. In Qazigund, an entire village, Wulangoo, with a population of around 1,000 was washed away. An unconfirmed report said 97 bodies had been recovered.

For people in the Valley, the troubles have just begun. Es-

sential items are fast running out of stock.

Officials said water supply wouldn't be restored till power was restored. And authorities in the power department said it would take them 7-10 days before power can be restored. They said the snow-covered streets had made it impossible for them to start restoration work. Sources said 12 snow-clearing machines meant for the city had to sent to Gulmarg, where the international skiing tournament is on.

"We heard on the radio that the snow has been cleared. But we don't see anything," said an angry Gushan Akhtar, a government employee who had to walk five

km through the snow-covered streets to reach her office. A shopkeeper in Lal Chowk complained the civil machinery had failed completely.

In Jammu, official reports claimed 34 bodies had been recovered since Sunday night with many reported missing. The Jammu-Srinagar highway remained closed for the fifth day, with little hopes of it opening before the weekend.

The IAF airlifted 48 foreign tourists from Padam-Zaskar.

Chief Minister Mufti Mohammad Sayed and his ministerial team, barring Muzaffar Hussain Baigh and Peerzada Mohammad Sayed are in Jammu. None of them has visited the valley so far.

Article de l'Hindustan Times sur la situation avalancheuse exceptionnelle au Cachemire en Février 2005

En dehors de l'importance de la neige pour les applications climatiques et hydrologiques, il faut aussi mentionner les avalanches, dont le déclenchement est lié à des conditions internes favorables du manteau neigeux. Les avalanches tuent en moyenne cent cinquante personnes par an en Europe, un peu moins d'une cinquantaine en Amérique du nord. Dans ces régions, la plupart du temps ce sont les pratiquants de la montagne qui déclenchent l'avalanche qui les ensevelit. Mais quelquefois des victimes sont à déplorer dans des habitations comme dans les Alpes en février 1999, où une soixantaine de victimes ont été déplorées (plusieurs avalanches meurtrières en France, Suisse, Autriche, Italie). Dans le monde, il n'est pas rare de rencontrer des avalanches tuant plus d'une centaine de personnes et ensevelissant des villages (Turquie, Afghanistan, Inde, ...). L'implication forte de Météo-France dans la recherche et la prévision du risque d'avalanche date de 1970, l'hiver 1969/1970 particulièrement meurtrier, avait conduit les pouvoirs publics à organiser la prévention des avalanches en France.

La neige a un impact économique certain dans les zones de montagne de nos régions. D'où l'intérêt pour les études d'impact des changements climatiques sur l'enneigement. L'aspect ludique et familier de la neige met l'accent sur ce type d'impact en France (les nombreuses sollicitations médiatiques sur ce sujet qui arrivent au Centre d'études de la neige en témoignent), mais la question des ressources en eau au niveau régional est cruciale et mérite aussi de l'attention. En effet, l'eau va devenir, en particulier sur la zone méditerranéenne une ressource qu'il faudra partager et donc mieux suivre en terme de quantité et qualité.

Enfin, le rôle du manteau neigeux est aussi important pour la faune et la flore de montagne, bien adaptées à la présence de neige pendant des durées importantes au cours de l'année. Un réchauffement du climat associé à une diminution de la présence de neige au sol dans les montagnes des climats tempérés risque d'engendrer la disparition de certaines plantes alpines au profit d'espèces situées actuellement plus bas en altitude.

Le Centre d'études de la neige s'est beaucoup investi dans les années 70 et 80 dans la modélisation du manteau neigeux pour la prévision du risque d'avalanche. L'objectif principal était de simuler l'évolution des caractéristiques physiques et mécaniques des couches internes du manteau neigeux en fonction des conditions météorologiques observées, analysées ou prévues. Cet effort de développement a permis de bâtir, entre autres, la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA, couplage entre un système d'analyse des conditions météorologiques adapté à la montagne, un modèle d'évolution multicouche du manteau neigeux décrivant la stratigraphie et un module d'analyse des résultats de la simulation du manteau neigeux en terme de risque et type d'avalanche. Pour simuler la diversité des conditions (massif, altitude, exposition, pente), ce sont ainsi plus de 5000 simulations du manteau neigeux qui sont faites tous les jours pour les besoins de la prévision du risque d'avalanche. Cette chaîne est toujours sans équivalent dans le monde et a permis de nombreuses recherches dont certaines présentées ici. Mon travail de recherche peut aussi être vu comme un effort de valorisation de cette chaîne.

Les travaux présentés dans ce mémoire sont regroupés en trois parties : modélisation du manteau neigeux, applications dans le domaine du climat et applications dans le domaine de l'hydrologie. Même si ma position de responsable du Centre d'études de la neige de 1998 à 2004 m'a permis d'avoir une vision globale des travaux de recherche du Centre, ne sont repris ici que les travaux de recherche où ma contribution a été significative. On se référera à la partie « travaux et publications » de ce mémoire pour les aspects liés à l'animation scientifique et à la participation à la communauté scientifique.

La première partie du rapport scientifique regroupe l'ensemble des travaux liés directement à la validation, au couplage et à la valorisation du modèle de neige CROCUS. Il s'agissait tout d'abord de valider le modèle sur un site bien instrumenté (le laboratoire du Col de Porte). Le problème des flux turbulents a dû être traité pour trouver une paramétrisation adéquate. Grâce à la disponibilité de l'outil d'analyse SAFRAN, des validations du système couplé SAFRAN-CROCUS à l'échelle des Alpes et des Pyrénées ont été effectuées. La suite des travaux sur ce thème a porté sur l'utilisation de CROCUS sur d'autres jeux de données dans le cadre de comparaisons internationales (PILPS 2(d), GSWP, SnowMIP, ...) et la comparaison avec d'autres schémas de surface (en particulier la paramétrisation de la neige du schéma de surface ISBA). Le but de ces travaux étant l'amélioration du modèle, mais aussi la détermination des phénomènes physiques les plus importants à prendre en compte en fonction des conditions d'utilisation.

La deuxième partie est consacrée aux études dans le domaine du climat. Le fil conducteur de ce thème est le lien entre le manteau neigeux et le climat. Il a été abordé tout d'abord sur les Alpes et les Pyrénées, avec des tests de sensibilité à des variations des paramètres météorologiques et le développement de techniques de régionalisation adaptées. Ces travaux ont eu un prolongement naturel dans l'étude de simulations climatiques du climat présent et des réanalyses du Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme, au titre de la validation des entrées météorologiques en amont de la méthode de régionalisation. Des applications à d'autres zones ont été réalisées, tout d'abord avec le couplage expérimental CROCUS-ARPEGE, et l'utilisation de CROCUS (en mode forcé) en conditions polaires.

Enfin, la dernière partie de ce rapport est consacrée aux applications hydrologiques. Le cadrage général de ces travaux de recherche a été donné par le projet GEWEX-Rhône. Ma contribution à ce projet a bien évidemment été centrée sur la modélisation du manteau neigeux. La première action de recherche a consisté en l'étude détaillée d'un petit bassin versant de haute-montagne, le bassin versant de Sarennes. Ce projet a permis une discussion sur le rôle de la neige dans les crues. Enfin, dans le cadre du projet général GEWEX-Rhône, c'est la modélisation du manteau neigeux, la sensibilité à la résolution et l'impact hydrologique du changement climatique qui ont été abordés.

2 La modélisation du manteau neigeux :

Le Centre d'études de la neige (CEN) s'est intéressé très tôt à l'hydrologie du manteau neigeux et à sa modélisation (Poggi, 1966, Obled, 1971 ...), mais s'est orienté assez vite vers le thème de la prévision du risque d'avalanche, qui nécessite de connaître précisément l'état interne du manteau neigeux. J.-P. Navarre (1975) a développé le premier modèle décrivant précisément l'état du manteau neigeux. A partir du milieu des années 1980, le CEN a développé le modèle CROCUS, modèle multicouche d'évolution énergétique (Brun et al, 1989), puis stratigraphique (Brun et al, 1992), du manteau neigeux. La disponibilité d'un modèle robuste et détaillé du manteau neigeux a permis de nombreuses applications au sein du CEN. Il s'agissait en tout premier lieu des applications à la prévision du risque d'avalanche. Pour ma part, je me suis investi dans les applications à la climatologie nivale et à l'hydrologie des régions de montagne.

Ce chapitre présente les activités centrées sur la modélisation du manteau neigeux, en terme de validation, études de sensibilité, comparaison et intercomparaisons de modèles de neige, auxquelles j'ai participé. Ce travail a été mené en collaboration étroite avec les autres unités de recherche du CNRM et a permis de comparer les différentes paramétrisations utilisées par Météo-France (le Tableau 1 présente les quatre principales paramétrisations et leurs utilisations pour faciliter la compréhension de la suite du rapport). L'essentiel de mon travail a été consacré au modèle CROCUS. L'expérience acquise pour la validation de ce modèle m'a permis progressivement de traiter certains problèmes scientifiques comme la paramétrisation des flux turbulents et de participer activement aux exercices d'intercomparaison, jusqu'à l'organisation de l'intercomparaison SnowMIP.

2.1 Validation du modèle CROCUS

Le premier travail auquel j'ai participé avait pour objet la validation du modèle CROCUS (Figure 1), dans sa version uniquement énergétique (Brun et al, 1989) dans le cadre d'un stage d'approfondissement. Le site du Col de Porte avait été doté à cette occasion d'une instrumentation spécifique et d'une nouvelle centrale de mesure. Les différents types de temps ont permis de faire des validations modulaires :

- conduction, en se basant uniquement sur les mesures de disques de tassement à l'intérieur du manteau neigeux ;
- flux turbulents, en étudiant certaines nuits ayant un refroidissement nocturne bien marqué ;
- rayonnement solaire, en prenant une période ensoleillée et froide ;
- schéma de percolation pendant la période de fonte.

Il est apparu assez vite certaines difficultés lors de cette validation, en particulier l'absence de gestion du type de neige pour la paramétrisation de l'albédo et de l'écoulement. D'autres problèmes liés à la connaissance de la répartition spectrale de l'énergie solaire et des phénomènes turbulents en présence de stratification stable de l'atmosphère ont été mis en évidence.

Les principales paramétrisations du manteau neigeux utilisées par Météo-France
<p>ISBA-OP : ISBA opérationnel,</p> <p>Description : modèle à une couche de neige évoluant en fonction des précipitations, de l'évaporation/sublimation et de la fonte. L'albédo de la neige est constant. La proportion de la maille enneigée dépend de l'équivalent en eau de la neige. Le coefficient de conduction en surface ne tient pas compte de la présence de neige. La fonte est calculée en ramenant la température de surface à 0°C et en faisant faire fondre la quantité correspondante de neige.</p> <p>Nombre de couches de neige : 1 Variables pronostiques : équivalent en eau de la neige Utilisation : prévision numérique du temps, ARPEGE et ALADIN</p>
<p>ISBA-D95 : schéma de neige à une couche, Douville, 1995</p> <p>Description : modèle à une couche de neige évoluant en fonction des précipitations neigeuses, de l'évaporation/sublimation et de la fonte. L'albédo est une fonction décroissante de l'âge de la neige (décroissance accélérée s'il y a fonte). La densité est traitée comme une variable pronostique (elle croît exponentiellement en fonction du temps et diminue en cas de chute de neige). La densité intervient dans le calcul du terme de fonte (via un coefficient thermique). Les propriétés thermiques du sol sont modifiées en présence de neige.</p> <p>Nombre de couches de neige : 1 Variables pronostiques : équivalent en eau de la neige, densité, albédo. Utilisation : ARPEGE Climat, Mésos-NH, utilisations mode forcé</p>
<p>ISBA-ES : ISBA Explicit snow, schéma à trois couches de neige, Boone et Etchevers, 2001</p> <p>Description : modèle à 3 couches de neige, permettant de simuler la rétention d'eau dans le manteau neigeux, la pénétration du rayonnement solaire, le vieillissement de la neige et l'évolution de la densité dans les différentes couches.</p> <p>Nombre de couches de neige : 3 Variables pronostiques : albédo, chaleur spécifique, densité, épaisseur de chaque couche de neige. Utilisation : utilisations mode forcé, chaîne SIM</p>
<p>CROCUS : modèle de neige multicouche décrivant la stratigraphie du manteau neigeux, Brun et al, 1989, 1992.</p> <p>Description : modèle décrivant en détail les différents processus physiques à l'intérieur du manteau neigeux : transfert de chaleur, changement de phase, tassement, métamorphose des grains de neige. Modèle développé pour la simulation de la stratigraphie du manteau neigeux dans le cadre de la prévision du risque d'avalanche.</p> <p>Nombre de couches de neige : variable de 1 à 50, en fonction de l'épaisseur de neige et de la stratification Variables pronostiques : température, densité, teneur en eau liquide, type de grains et épaisseur de chaque couche de neige. Nombre de couches de neige variable. Utilisation : prévision du risque d'avalanche, chaîne SCM, études manteau neigeux, utilisations mode forcé</p>

Tableau 1 : Les principales paramétrisations du manteau neigeux utilisées par Météo-France

Le développement ultérieur (Brun et al, 1992) de la partie « stratigraphie » du modèle a permis d'apporter une réponse aux aspects albédo et rayonnement, et de compléter la simulation du tassement. L'étude des flux turbulents a fait l'objet d'études spécifiques décrites dans le paragraphe suivant.

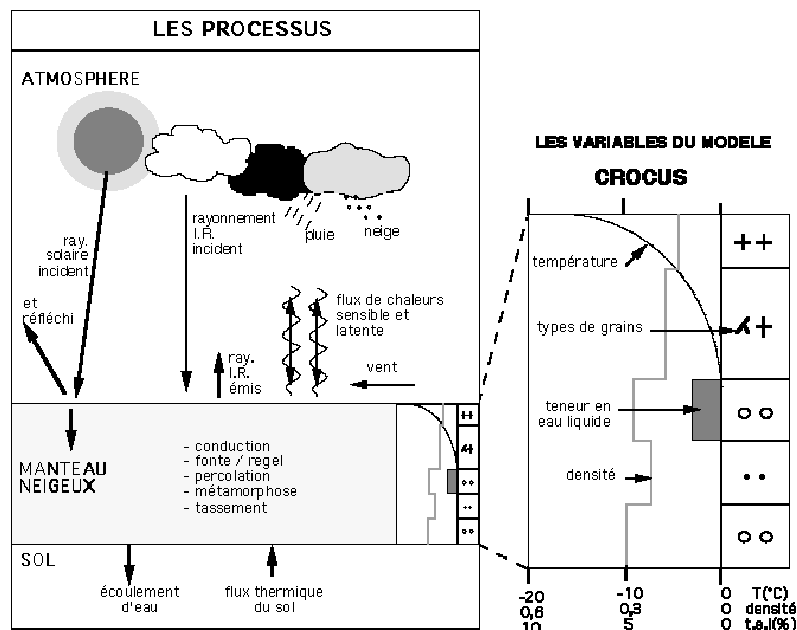


Figure 1 : Schéma de principe du modèle CROCUS.

Le développement du système d'analyse SAFRAN (Durand et al, 1993, 1999) a constitué une avancée significative pour le CEN et a permis d'étendre singulièrement le champ d'application du modèle CROCUS. En fournissant des analyses météorologiques adaptées au fonctionnement du modèle sur les massifs des Alpes et des Pyrénées, il a ouvert la voie à la simulation des profils du manteau neigeux et de la stabilité (chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA, Tableau 2) pour la prévision du risque d'avalanche et aussi aux applications en hydrologie et climat.

Grâce à ces nouvelles données, j'ai pu effectuer une validation de CROCUS couplé avec SAFRAN (Martin et al, 1994) à partir de hauteur de neige mesurées sur un grand nombre de postes. Les validations précédentes avait en effet montré qu'une bonne simulation de la hauteur de neige sur l'ensemble d'un hiver garantissait une bonne simulation du bilan de masse et d'énergie.

Pour cela, 37 sites ont été sélectionnés. Ils disposaient tous d'une série de données assez longue sur la période été 1981-été 1991. En cas d'observations humaines, les observations devaient être de bonne qualité, et les sites devaient être peu influencés par le transport de neige par le vent. Sur les 37 sites, 35 ont été des postes du réseau nivométéorologique, et 2 des stations automatiques Nivôse.

La Chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA

La chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA a été conçue par le Centre d'études de la Neige pour servir notamment d'aide au prévisionniste « avalanche ». La modélisation permet notamment de multiplier les points de simulation. SCM est composée de trois modules : un système d'analyse météorologique (SAFRAN), un modèle d'évolution du manteau neigeux (CROCUS) et un système expert (MEPRA) qui analyse les profils du manteau neigeux simulé en terme de risque.

SAFRAN (Durand et al, 1993)

L'échelle de travail du prévisionniste étant le massif (une région de 500 à 1000 km²), le système d'analyse SAFRAN considère que les conditions météorologiques sont homogènes à cette échelle. Cette hypothèse permet toute interpolation au sein d'un massif tout en respectant les variations liées à l'altitude, l'exposition.... L'analyse utilise principalement la méthode d'interpolation optimale. SAFRAN utilise en entrée les résultats du modèle de prévision ARPEGE, des images satellitales (classification nuageuse) et les observations des différents réseaux de mesures, dont celles du réseau nivométéorologique. Enfin, SAFRAN utilise aussi des informations climatologiques, en particulier pour l'analyse des précipitations.

Les deux premières étapes sont consacrées d'une part à l'analyse de la température, de l'humidité, du vent et de la nébulosité toutes les 6 heures ; d'autre part à l'analyse des quantités quotidiennes de précipitation. La troisième étape est l'interpolation horaire de ces paramètres (y compris la phase des précipitations), ainsi que le calcul des termes de rayonnement. En mode prévision (24 ou 48 heures), les quantités de précipitation sont analysées à partir des valeurs calculées par ARPEGE (corrigées de leur biais systématique) et des résultats d'une recherche de situation analogue.

CROCUS (Brun et al, 1989, 1992)

Il s'agit d'un modèle unidimensionnel calculant l'évolution énergétique, stratigraphique et massique du manteau neigeux. Il utilise les données analysées par SAFRAN et simule les paramètres suivants : température, densité, teneur en eau liquide et type de grains. Son originalité tient au fait qu'il calcule les métamorphoses des grains de neige à partir de lois expérimentales. L'albédo et l'extinction du rayonnement solaire dans la neige dépendent des types de grains.

MEPRA (Giraud, 1992)

Ce système expert calcule à partir des profils simulés par CROCUS des paramètres mécaniques supplémentaires : résistance, contraintes limite de cisaillement... . Après une classification des profils stratigraphiques et de résistance, MEPRA analyse la stabilité mécanique du manteau neigeux et en déduit un risque d'avalanche sur six niveaux, ainsi que le type d'avalanche. L'analyse du risque accidentel (présence d'une surcharge) est effectuée ensuite à l'aide d'une échelle à quatre niveaux.

Utilisation opérationnelle

La chaîne est activée sur 24 massifs dans les Alpes (dont un en Suisse dans le cadre d'un projet de recherche) et 21 massifs pour les Pyrénées (11 pour la France et l'Andorre, 10 pour l'Espagne). La chaîne utilise des observations des pays voisins (Italie, Suisse et Espagne). Une sélection de résultats est envoyée à l'INM (Saragosse) pour les massifs espagnols.

Pour chaque massif, des simulations sont effectuées par pas de 300 m d'altitude, et à chaque niveau on tient compte de 7 orientations (N, E, SE, S, SO, O, plat) et de deux pentes (20 et 40 °). Environ 2700 profils sont simulés pour la chaîne « Alpes », 2500 pour la chaîne « Pyrénées ». Une réinitialisation est effectuée chaque année le 1^{er} août sans neige, SCM fonctionne ensuite toute l'année sans aucune réinitialisation.

Tableau 2 : Description de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA

Cette validation a montré la bonne qualité globale du système couplé SAFRAN/CROCUS (voir un exemple de résultat Figure 2) sur les Alpes. Cependant, un certain nombre de faiblesses ont été mis en évidence pour des sites particuliers. Elles concernent :

- L'absence d'homogénéité à l'intérieur d'un massif : une des hypothèses fortes de SAFRAN est l'homogénéité à l'intérieur d'un massif, ce qui permet toute interpolation au sein d'un même massif. Cette hypothèse n'est pas toujours valable, comme pour le site des Ménuires, qui reçoit environ 15% de précipitation en moins que les autres postes du massif.
- L'estimation des précipitations à haute altitude : l'analyse SAFRAN se base sur la climatologie AURELHY, mais cette climatologie doit être extrapolée à haute altitude selon un gradient prédéfini. Ce gradient a été corrigé par la suite.
- Le transport de neige par le vent : dans ce cas, la hauteur de neige simulée par CROCUS s'avère être mauvaise.

- La densité faible de données : ainsi les postes des Alpes du sud où la densité d'observations est plus faible que les Alpes du nord sont moins bien analysés par SAFRAN. Ceci se traduit par une simulation de la hauteur de neige moins bonne au jour le jour, mais, les erreurs se compensant, une simulation correcte de la climatologie de l'enneigement.

Cette validation a été également faite sur les Pyrénées, après le développement de SAFRAN sur ce massif (Martin et al, 1996).

Une validation en terme de durée de l'enneigement a été menée sur 7 sites où les données de début et fin de saison étaient observées (Martin, 1995). Les résultats sont essentiellement liés à la date de la première chute de neige par SAFRAN, et à la bonne simulation du taux de fonte au printemps par CROCUS, ce qui n'est pas toujours le cas sur certains postes (proximité de bâtiments par exemple). Néanmoins la fourchette d'erreur reste acceptable.

Le modèle CROCUS a également été testé par d'autres laboratoires, ce qui a permis de compléter la validation du modèle. Ainsi, le Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement a utilisé CROCUS dans le cadre d'une collaboration sur la neige polaire (voir plus loin §3.4), puis dans le cadre de la thèse en cours de Martin Gerbaux sur la simulation des bilans de glace des glaciers alpins. L'université de Vancouver a simulé le manteau neigeux sur le site de Roger Pass, dans les Rocheuses canadiennes (Mingo et al, 1997). Ross Brown (Service météorologique du Canada) a utilisé le modèle CROCUS sur des données canadiennes. Stéphane Savary et Monique Bernier (Institut national de la recherche scientifique, Québec, Savary et al, 2004) ont testé CROCUS sur des données du nord du Québec. Pour ces deux dernières applications, le modèle a nécessité un nombre limité d'adaptations : hauteur de rugosité (abaissée par rapport au Col de Porte), augmentation de la densité de la neige fraîche essentiellement.

2.2 La place des flux turbulents dans le bilan énergétique de surface

Par comparaison à un sol « normal » (prairie par exemple), le sol enneigé possède des propriétés particulières qui influencent le bilan énergétique de surface :

- L'albédo est élevé, ce qui fait que l'énergie solaire absorbée est relativement faible.
- La neige est une surface lisse, les échanges turbulents sont donc aussi plus faibles que sur un sol déneigé.
- La neige est un puits de chaleur latente, ce qui fait que pendant les périodes de fonte, la température de surface reste à 0°C.

Ces propriétés sont bien connues, et conduisent en général à une température de surface plus froide que celle de l'air, et donc une stratification stable de l'atmosphère près de la surface.

Dès la validation de la version énergétique de CROCUS (Brun et al, 1989), le problème de la paramétrisation des échanges turbulents est apparu. Dans ce type de modèle, c'est une paramétrisation par des coefficients d'échanges qui est utilisée, ces coefficients dépendant de la rugosité de la surface (caractérisée par la longueur de rugosité, z_0) et par la stabilité de l'air (évaluée par le nombre de Richardson de gradient, Ri). L'application des théories classiques conduit à des échanges turbulents très faibles (voire nuls) et des températures de surface sous-estimées. En effet, ces théories supposent une homogénéité horizontale, ce qui n'est pas le cas en montagne. Il est apparu assez vite que l'utilisation de CROCUS nécessiterait un étalonnage des coefficients d'échanges différent sur chaque site d'utilisation.

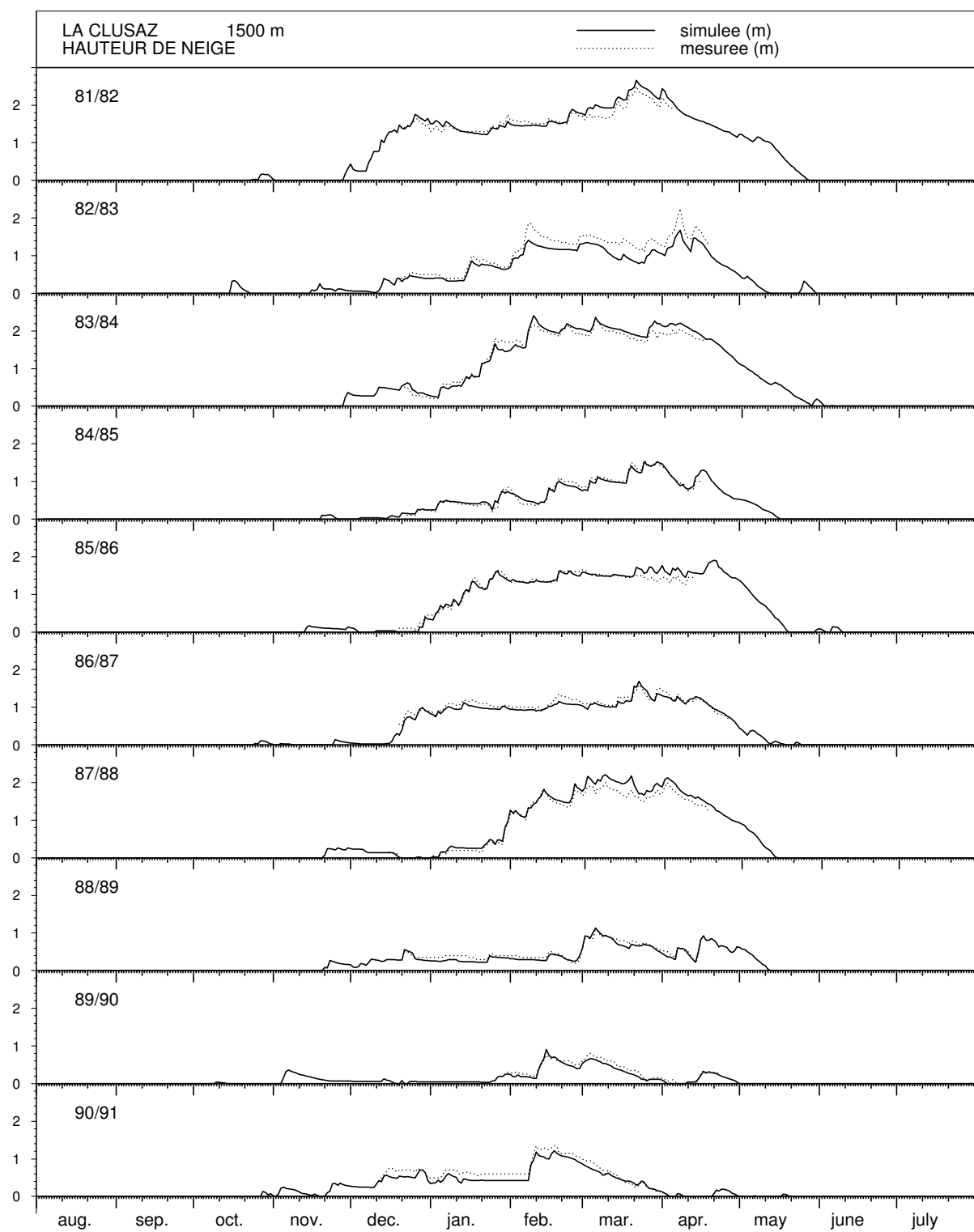


Figure 2 : Comparaison entre hauteur de neige simulée et mesurée à La Clusaz
(d'après Martin et al, 1994)

Sur ce thème, le fil conducteur de la recherche a été d'une part de documenter les échanges turbulents, et d'autre part de chercher des données pour évaluer l'approche « coefficient d'échanges » implantée dans le modèle. Ceci s'est traduit par une étude sur le Col de Porte des nuits avec refroidissement marqués, et par l'exploitation des données de la campagne LEADEX, en Arctique (Martin, 1988, Martin et Lejeune, 1998).

Compte-tenu de la difficulté de déterminer les valeurs du coefficient d'échanges, une méthode de type inverse a été utilisée. Connaissant tous les autres termes du bilan de surface grâce aux instruments installés sur le site (rayonnement infrarouge incident et réfléchi), le flux de chaleur turbulent a été ajusté dans le modèle CROCUS pour rendre compte de la température de surface observée. Les variations du coefficient d'échange C en fonction du vent moyen sur une heure ont été tracées sur la Figure 3.

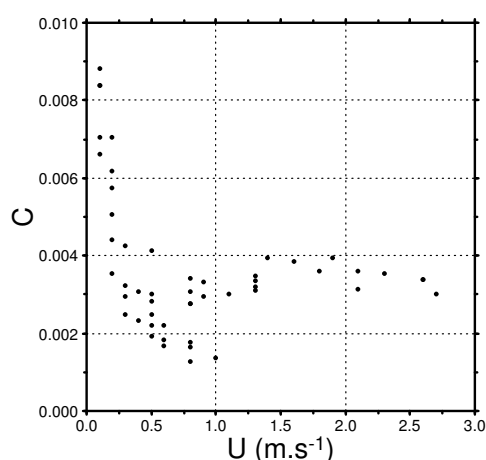


Figure 3 : Variations du coefficient d'échanges C en fonction du vent (d'après Martin et Lejeune, 1998)

Il apparaît que dans ces situations nocturnes très stables le coefficient d'échange « observé » reste non nul : des échanges se produisent donc systématiquement. La turbulence a dans ce cas-là des origines mécaniques (brises de pente). En deçà de 1 m/s, le coefficient C est très variable. Dans le cas d'un vent faible, le seuil de démarrage des anémomètres joue beaucoup sur la valeur de la moyenne du vent, les plus faibles valeurs de vent du graphique sont donc à considérer avec précaution. A ces problèmes s'ajoutent probablement un changement du régime de la turbulence dans les régimes très stables (échanges par intermittence), mais les moyens mis en œuvre n'ont pas permis d'avancer une quelconque hypothèse sur ce sujet.

LEADEX a été une expérience météorologique conduite dans la mer de Beaufort. Le camp de base était situé sur le pack, à 270 km au nord de la côte de l'Alaska. Des données de forçage étaient disponibles pendant un mois (23 mars – 22 avril 1992), y compris des mesures de flux turbulents de chaleur sensible. Dans 60% du temps, la stratification de l'atmosphère était stable (contre 95% dans le cas du Col de Porte). Des tests (Martin et Lejeune, 1998) ont montré que le modèle CROCUS simulait bien les périodes de stratifications stables et instables, l'allure générale des variations des flux, mais les flux du modèle étaient systématiquement surévalués. Malheureusement, le jeu de données ne précisait pas les conditions initiales du manteau neigeux. Comme finalement les simulations

étaient assez sensibles à cet état initial, il n'a pas été possible de trouver l'explication de cet écart.

La valeur du coefficient d'échanges trouvé au Col de Porte a été intégré dans CROCUS et est utilisé dans la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA.

2.3 Vers une intercomparaison des modèles de neige

Le modèle CROCUS étant pratiquement sans équivalent dans le monde au niveau de la description de l'état interne du manteau neigeux, son utilisation pour des applications autres que la prévision des avalanches méritait d'être évaluée. Les motivations pour s'investir dans cet axe de recherche étaient doubles :

- D'une part un modèle détaillé du manteau neigeux pouvait être utilisé comme référence pour le développement de modèles plus simples, comme les paramétrisations de surface dans les modèles de circulations générales ou les modèles hydrologiques.
- D'autre part, il était clair que la confrontation avec d'autres modèles serait bénéfique pour CROCUS, pour les aspects bilan énergétique de surface, hydrologiques notamment.

Le modèle CROCUS a donc été appliqué à différents jeux de données. Cette action, ainsi que le travail mené en parallèle sur la valorisation des données du Col de Porte, permettait progressivement d'acquérir de l'expérience pour assurer le pilotage d'une l'intercomparaison consacrée aux schémas de neige : SnowMIP.

2.3.1 Le couplage CROCUS/ISBA

Le modèle CROCUS ne gère pas le sol sous-jacent. Le flux à la base du manteau neigeux est imposé. Dans des conditions alpines, il est de quelques $W\ m^{-2}$, sauf en début de saison ou en cas de très faible enneigement prolongé. Un manteau neigeux ayant atteint quelques dizaines de centimètres constitue un isolant suffisant pour que le flux arrivant à la base du manteau neigeux soit très régulier, et donc bien estimé par les formules très simples de CROCUS.

Du point de vue hydrologique aussi, CROCUS a des limitations. La percolation, paramétrisée de manière simple, par une méthode de réservoir (au-delà de la teneur en eau de rétention, l'eau liquide d'une couche passe immédiatement dans la couche située au-dessous). Enfin, n'ayant pas de sol, il ne peut pas gérer l'écoulement dans le sol. Des tests ont montré que la paramétrisation actuelle de la percolation ne modifiait pas significativement les cumuls des écoulements simulés pour des pas de temps quotidiens. Cette faiblesse n'a pas été corrigée car elle n'était pas limitante pour les applications visées.

La version du schéma de neige d'ISBA utilisée était celle développée par Hervé Douville (1995), soit ISBA-D95 (voir le Tableau 1). A l'occasion du couplage, la méthode de rappel thermique utilisée par ISBA pour calculer le flux de conduction sol – neige a été remplacée par un schéma de sol multicouche (10 couches pour ce couplage), inspiré de celui utilisé par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (Viterbo et Beljaars, 1995) (Figure 4).

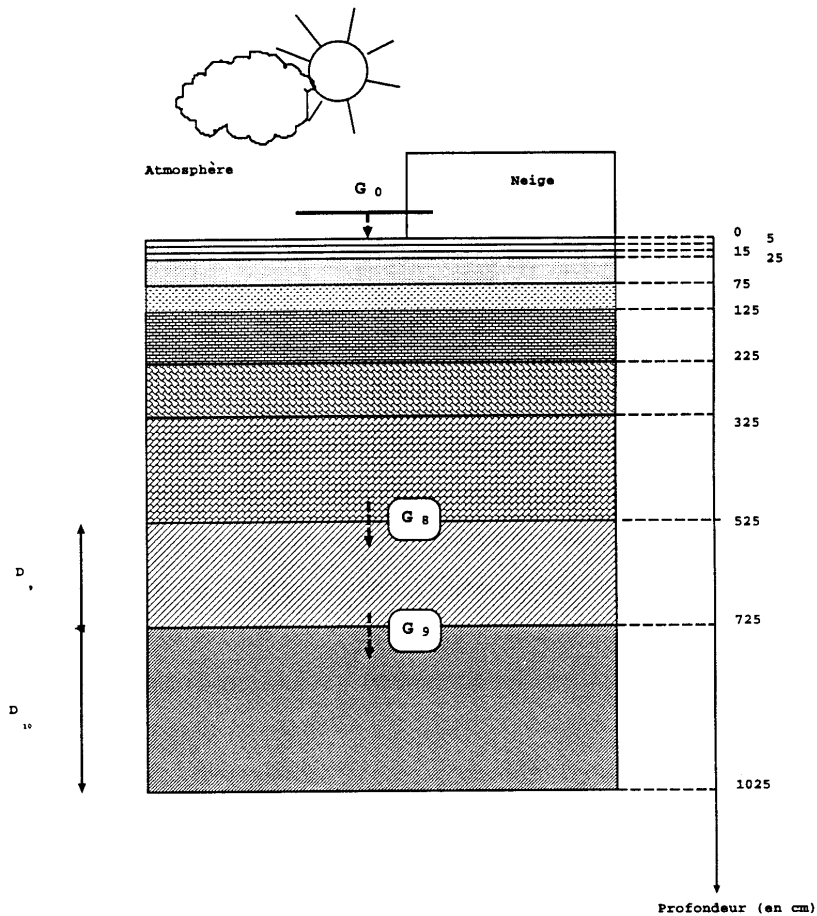


Figure 4 : Schéma du couplage avec les couches de sol pour CIRSE (Etchevers et Martin, 1997)

ISBA-D95, CROCUS et CIRSE (acronyme pour « CROCUS et ISBA réunis pour une simulation expérimentale ») ont été testés sur les données du Col de Porte pour les saisons 1993/94, 1994/95, 1995/96 (Etchevers et Martin, 1997). La prise en compte d'un sol à 10 couches, en l'absence de mesures de température dans le sol pour l'initialisation nécessite un bouclage sur un cycle annuel pour équilibrer le sol. Alors que pour ISBA-D95 2 cycles annuels suffisent pour établir un équilibre, CIRSE a besoin de 8 à 12 cycles.

Même si des différences sont visibles dans certains cas, CROCUS, CIRSE et ISBA-D95 simulent de manière globalement satisfaisante le manteau neigeux et l'hydrologie (terme de drainage).

Des comparaisons sur le site de Bellecôte (1995/96 et 1996/97, massif de la Vanoise, 3000 m) ont permis de mettre en évidence un phénomène nécessaire pour une bonne simulation du manteau neigeux du point de vue hydrologique. Il s'agit de la rétention d'eau par le manteau neigeux. Pour ISBA-D95, l'eau de fonte produite à la surface est immédiatement transférée au sol. Dans CROCUS, la rétention d'eau fait que l'eau de fonte peut regeler pendant la nuit, et que l'eau doit percoler de couche en couche avant que celle-ci ne soit disponible au sol.

Dans le cas d'un manteau neigeux de haute altitude, la phase d'accumulation est bien séparée de la phase de fonte (avril–juillet). Le début de la période de fonte simulée par ISBA-D95 (mi avril) est très en avance sur CROCUS (écoulement à la base du manteau neigeux fin mai). L'influence de la rétention d'eau près de la surface n'est pas quantifiable précisément (à cause des rétroactions existantes entre les différents termes du bilan de surface), mais on constate que CIRSE a fait regeler 250 mm d'eau du 1^{er} mai à la fin du

manteau neigeux en 96/97. Ainsi, le 1^{er} juillet « l'avance » prise par ISBA-D95 sur CIRSE sur l'écoulement à la base (terme de drainage) est de 300 mm.

Les comparaisons entre ISBA et CROCUS ont été prolongées avec les données du forçage du projet GSWP (Global Soil Wetness Project) (Etchevers et al, 1999) dans une simulation sur l'ensemble de l'hémisphère nord. ISBA-D95 et CIRSE ont donné des résultats très proches, des différences apparaissant localement, sans que les données de validation proposées (couverture de neige hebdomadaire du NESDIS, ou climatologie de l'USAF) ne permettent de trancher. Les différences observées entre les deux modèles étaient liées aux différences de traitement des flux turbulents, de l'albédo et du regel de l'eau liquide dans le manteau neigeux.

2.3.2 L'expérience PILPS 2(d) : simulations sur le site de Valdaï

Dans la continuité logique du couplage CROCUS/ISBA, le CEN a participé à la phase 2(d) de l'expérience PILPS (Project for the Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes). La phase 2 correspond à une intercomparaison de différents modèles forcés à partir d'observations. C'est le site de Valdaï qui a été retenu pour la phase 2(d) (Schlosser et al, 2000, Slater et al, 2001). Cette station de mesures météorologiques et hydrologiques est située entre Moscou et Saint-Pétersbourg. Les responsables de l'intercomparaison ont diffusé un jeu de données couvrant 18 ans. Différentes expériences ont été demandées en plus d'une simulation de contrôle : années particulières (sèches ou humides), sensibilité aux conditions initiales, modifications du rayonnement infrarouge incident.

Cette longue série de données a permis de conforter nos idées sur le rôle de la rétention d'eau dans la phase de fonte. La Figure 5 montre une corrélation entre le cumul d'eau liquide regelée dans le manteau neigeux à partir du 1^{er} février et le décalage (en jours) de la date de disparition du manteau neigeux.

Les conditions particulières du site ont fait apparaître une différence entre ISBA-D95 et CROCUS liée à la paramétrisation des flux de surface (comme dans le cas des simulations GSWP) : l'albédo de CROCUS est beaucoup plus élevé que celui de la plupart des modèles de surface (dont ISBA-D95), par contre, les flux turbulents sont plus forts. Ainsi, on observe un phénomène de compensation entre flux radiatifs et flux turbulents sur les deux modèles. Les comparaisons de l'équivalent en eau du manteau neigeux (Figure 6) montrent des différences importantes entre les modèles : l'accumulation est plus forte dans CIRSE (qui a une température de surface plus froide) par condensation solide en hiver, alors que la fonte d'ISBA-D95 démarre trop tôt est plus lente.

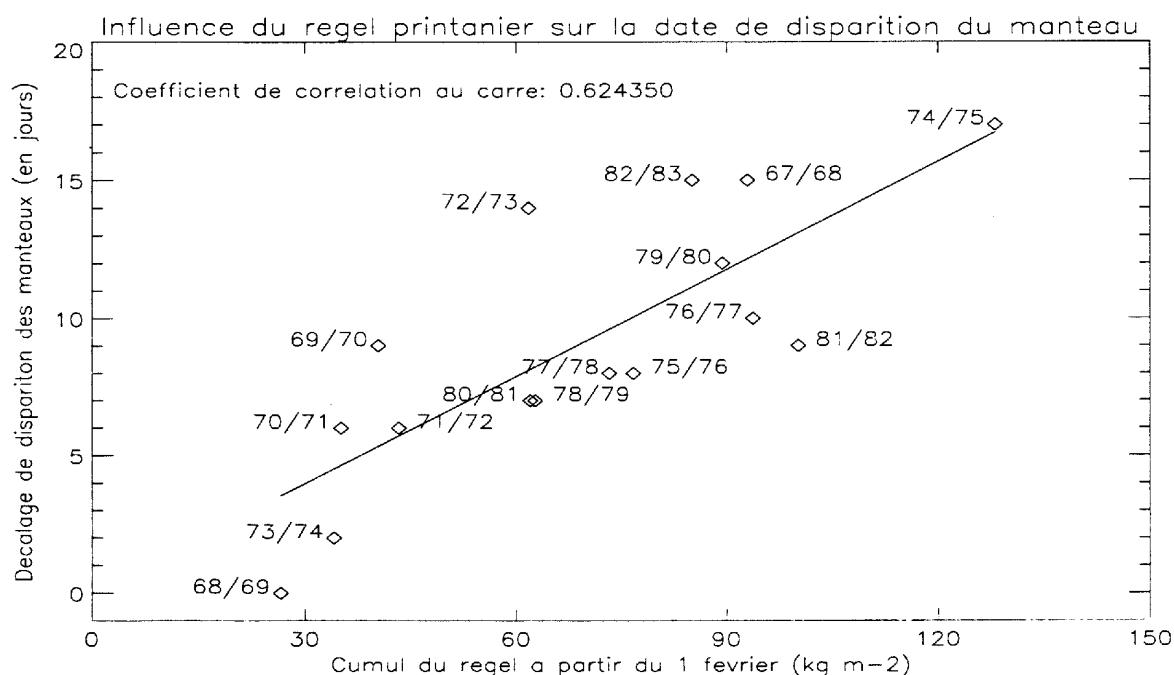


Figure 5: Expérience PILPS 2(d) : corrélation entre le cumul d'eau liquide regelée dans le manteau neigeux à partir du 1^{er} février et le décalage (en jours) de la date de disparition du manteau neigeux entre CIRSE et ISBA-D95 (Etchevers et Martin, 1997).

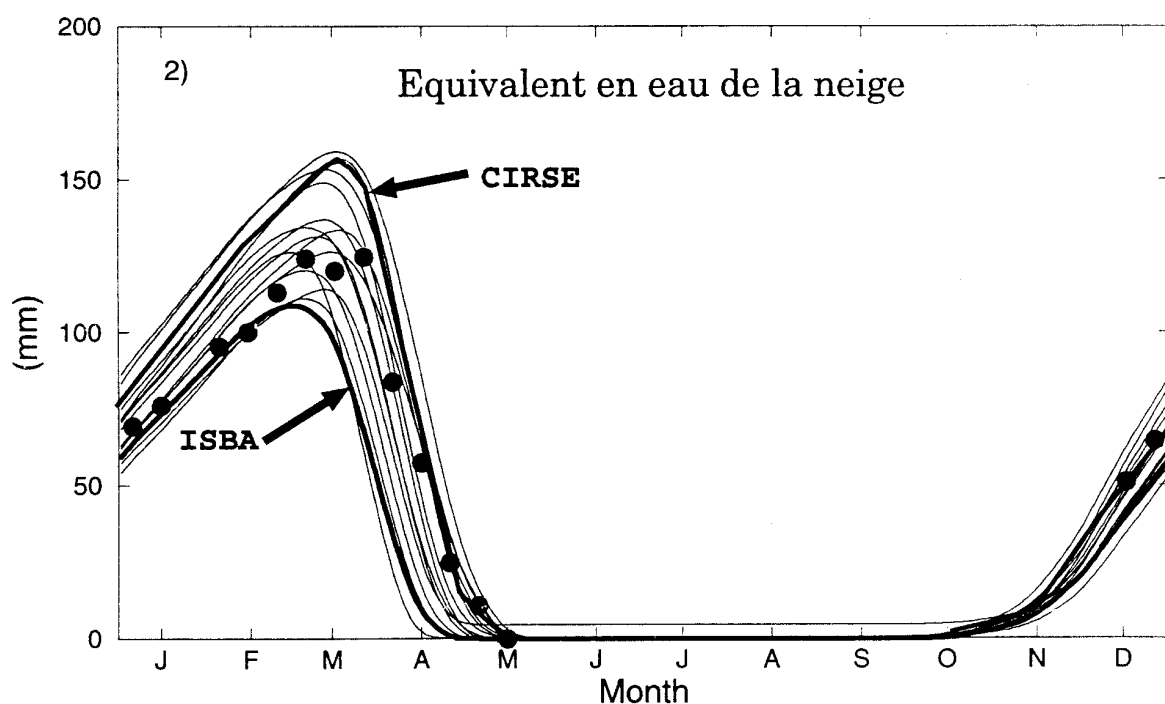


Figure 6: Moyennes mensuelles de 1966 à 1983 de l'équivalent en eau des modèles participant à PILPS 2(d). Les courbes correspondant à ISBA-D95 et CIRSE sont en traits épais, les points correspondent aux observations (Etchevers, 2000)

La participation à PILPS 2(d) a permis de faire connaître le modèle CROCUS et l'expérience du CEN dans la modélisation du manteau neigeux, tout en confirmant les conclusions tirées

de la comparaison CROCUS/ISBA-D95. CROCUS a d'ailleurs servi de référence dans un des articles de synthèse de PILPS 2(d) (Luo et al, 2002). En conclusion, les auteurs indiquent que l'introduction de lois de métamorphoses dans les modèles améliore de manière significative les résultats. Ces intercomparaisons, ainsi que le dialogue avec le Groupe de modélisation à moyenne échelle (développeur d'ISBA) ont permis le développement d'une amélioration d'ISBA : ISBA-ES pour Explicit-snow (Boone et Etchevers, 2001). Ce nouveau schéma permet de simuler la rétention d'eau, la métamorphose et possède 3 couches de neige (voir Tableau 1

2.4 L'intercomparaison des modèles de neige SnowMIP

L'idée d'une intercomparaison centrée sur la neige est née lors de la première réunion du groupe de travail « Snow and Climate » de l'ICSI (International commission on snow and ice) de l'IAHS (International association of hydrological sciences) en 1995. Le groupe de travail, présidé par Eric Brun, en avait discuté mais s'était concentré sur l'écriture d'un livre de synthèse sur la neige et son influence dans différents domaines. Le groupe de travail « SnowMIP » que je présidais a été officiellement créé par le bureau de l'ICSI en 1999, avec un mandat de 4 ans. La prise en charge de l'animation de cette intercomparaison par le CEN (Pierre Etchevers, Yves Lejeune et moi-même) était la suite logique des travaux précédents. Avant la proposition officielle, des contacts ont été pris avec l'équipe en charge de l'animation de PILPS 2(d), les participants de l'intercomparaison, ainsi qu'auprès de nos contacts habituels pour en déterminer la faisabilité.

L'initiative de Richard Essery (qui avait utilisé les données du Col de Porte pour tester la paramétrisation du modèle de neige du Hadley Centre) d'écrire un article sur l'intercomparaison des différents modèles sur ce site s'est avérée être utile dans le cadre du montage du projet. L'article (A comparison of four models using observations from an alpine site, Essery et al, 1999) compare les modèles CROCUS, INM, ISBA-D95, UKMO sur les données du Col de Porte (hivers 1988/89 et 1994/95). Si les résultats des modèles étaient globalement bons, il est apparu que pour certains paramètres pris isolément (maximum de l'enneigement, densité, fin de l'enneigement,...) la dispersion était très grande. L'article mettait aussi en évidence l'importance de la documentation des modèles, des données de sortie (et leur résolution temporelle), en vue de l'interprétation des résultats.

SnowMIP a été organisée de manière classique : constitution d'un comité scientifique, recherche des données, établissement d'un cahier des charges pour les simulations, puis analyse. Alors que les objectifs de PILPS 2(d) étaient centrés sur le cycle de l'eau en région boréale, SnowMIP s'est concentré uniquement sur la neige. Nous avons voulu d'ailleurs ne pas tenir compte du sol dans les simulations et imposer un flux du sol prescrit, mais cela a surpris de nombreux participants et nous avons dû laisser la possibilité de simuler le sol (ce sont finalement les simulations avec flux prescrits qui ont été pénalisées car les flux imposés sur deux des sites se sont avérés être peu réalistes).

Quatre sites ont été retenus :

- Col de Porte (1320 m, France), un site de moyenne altitude,
- Weissfluhjoch (2540 m, Suisse), un site de haute altitude
- Sleepers Rivers (552 m, Etats-Unis), un site de moyenne altitude,
- Goose Bay (46 m, Canada), un site arctique.

Plusieurs expériences ont été définies afin d'aider le dépouillement ultérieur. Les données de forçages ont été diffusées fin 2000 pour remise des résultats en mars 2001. Une session spéciale neige a été organisée dans le cadre d'une assemblée générale de l'IAMAS à Innsbruck, ce qui a permis de présenter des résultats préliminaires et de réunir le comité

scientifique. Certains participants ont été autorisés à soumettre de nouvelles simulations car les résultats fournis apparaissaient incohérents. Les analyses ont pu se dérouler à partir de mi-2002 environ (Etchevers et al, 2002, 2003, 2004). 24 schémas et 18 équipes ont participé, dont ISBA-OP, ISBA-D95, ISBA-ES et CROCUS.

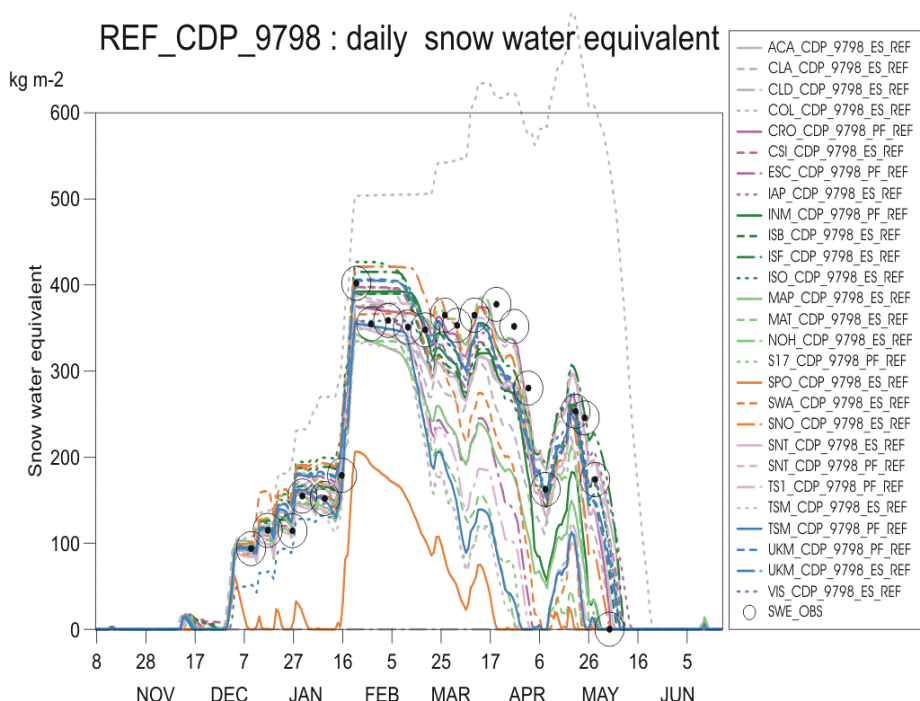


Figure 7 : Equivalent en eau du manteau neigeux simulé par les modèles de SnowMIP pour la saison 1997/98 du site du Col de Porte. Les observations d'équivalent en eau sont représentées par les points.

Les dispersions entre modèles sont parfois très importantes. La Figure 7 illustre cette dispersion des résultats pour la saison 1997/98 du Col de Porte. Certains modèles anticipent la fonte de plus d'un mois. Il est vrai que ce site de moyenne altitude connaît un climat tempéré même en hiver : une erreur faible sur une paramétrisation de la fonte peut donc avoir des conséquences importantes.

La mise en évidence d'une liaison entre niveau de détail et qualité de la simulation a été obtenue par une étude minutieuse sur différents épisodes particuliers. Par exemple, trois groupes de modèles et de comportement apparaissent pour la simulation de l'albédo paramétrisation basée sur l'âge, la température de surface (ou albédo constant), et enfin paramétrisation basée sur les types de grains ou de neige (ce dernier groupe s'avérant être le plus performant). La Figure 8 montre la dispersion des simulations d'albédo. Pendant la période du 20 avril au 2 mai, l'albédo observé reste élevé car le temps reste frais, les grains en surface se transforment peu et la fonte ne se déclenche pas. Seuls les modèles prenant en compte la métamorphose de la neige, même de manière simplifiée, sont capables de conserver un albédo élevé. Les paramétrisations basées sur l'âge donnent de très mauvais résultats.

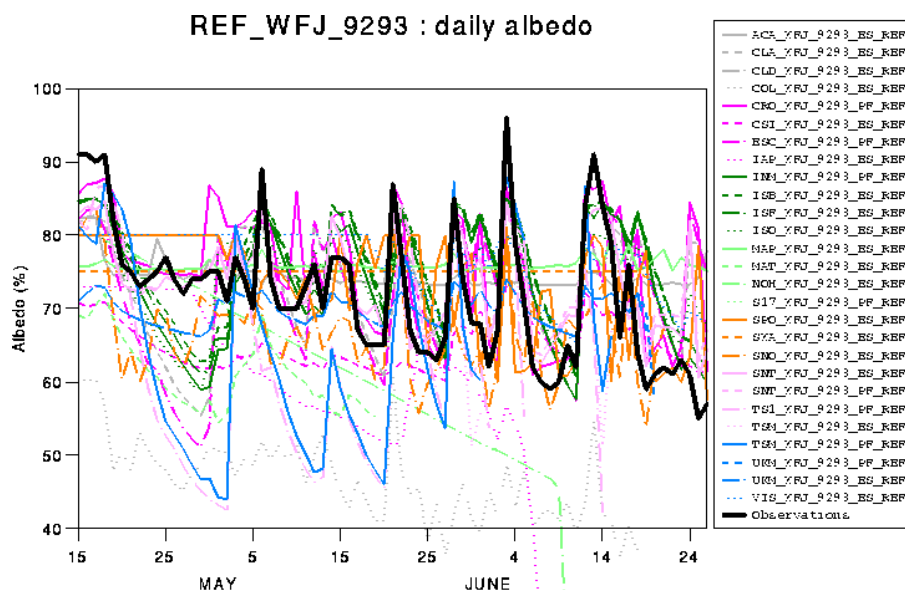


Figure 8 : Albédo simulé par les modèles de SnowMIP pendant la période de fonte pour le site du Weissfluhjoch (15 avril au 20 juin 1993).

La rétention d'eau agit sur l'écoulement à la base du manteau neigeux. Ainsi, sur le site du Weissfluhjoch, l'écoulement à la base commence 10 jours avant pour les modèles qui ne tiennent pas compte de l'eau stockée dans la neige. Enfin, SnowMIP n'a pas permis de trancher au niveau de la répartition entre flux solaire et flux turbulents dans le bilan énergétique de surface. Ainsi, CROCUS ayant un albédo élevé et des flux turbulents assez forts donne des bons résultats, tout comme le modèle du CSIRO, qui a un albédo faible et des flux turbulents plus faibles. Une étude complémentaire sur les profils détaillés du manteau neigeux pour les modèles détaillés est en cours par l'Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches en Suisse. Les données de SnowMIP ont été utilisées par Essery et Etchevers (2004) pour faire des études de sensibilité sur trois paramètres (albédo de la neige fraîche, taux de décroissance de l'albédo avec l'âge et la rugosité de surface) avec un modèle très simple, confirmant les résultats trouvés sur l'analyse des simulations SnowMIP.

2.5 Développement du couplage CROCUS-ISBA Routes

Le Centre d'études de la neige a participé, en collaboration avec le LCPC, le LRPC de Nancy, le CETE de Lyon, et la DDE38, au projet GELCRO, qui visait à mieux comprendre le comportement de la neige sur une chaussée. Ce projet a été réduit (au moins dans un premier temps) à l'étude du comportement d'une couche de neige naturelle sur une chaussée non traitée et non circulée. Ainsi, des planches de chaussées expérimentales ont été installées sur le site du Col de Porte (Figure 9). Les mesures météorologiques et nivologiques préexistantes ont été complétées par des mesures de température dans la chaussée, de hauteur de neige sur les planches expérimentales et de mesures vidéo. La phase intensive de la campagne de mesures a duré trois hivers. Après chaque chute de neige, des mesures manuelles, puis un déneigement, étaient effectués.

Le projet comportait une phase modélisation, dans laquelle il s'agissait de coupler le modèle CROCUS et le modèle GEL1D (modèle de propagation de front de gel dans les chaussées) développé par le LCPC (Frémond et Williams, 1979). Après un premier essai (Lassoued, 2000, Bouilloud, 2003), il a été décidé de remplacer GEL1D par ISBA (version diffusion de température). Les besoins de la modélisation ne justifiaient pas l'utilisation d'une description

très fine des fronts de gel ; en revanche, il était nécessaire de gérer des transferts hydrologiques en surface de la chaussée, ce que GEL1D ne pouvait pas faire. La difficulté du couplage résidait cette fois dans le fait qu'il fallait gérer de manière fines les très faibles couches de neige sur la chaussée, avec des flux de chaleur importants entre neige et chaussée (quelques centaines de $W\ m^{-2}$ à l'apparition de la neige) et les différentes conditions de l'interface neige/route. Il a donc été nécessaire de réaliser un couplage implicite entre les deux modèles et de modifier CROCUS pour garder autant que possible une couche de neige d'épaisseur constante (2.5 mm) à la base du manteau neigeux.



Figure 9 : Planches expérimentales de chaussées sur le site du Col de Porte, avec mesures de hauteur de neige, et caméras vidéo.

Pour l'évolution temporelle, c'est la présence ou l'absence d'eau à la base du manteau neigeux qui est déterminante. Dans le cas sec, il est possible de résoudre le profil de température dans les deux milieux en tenant compte d'une résistance thermique à l'interface. En présence d'eau, la résistance thermique entre la route et la neige devient infinie, les échanges de chaleur se font sous forme de chaleur latente. Enfin, la paramétrisation des remontées capillaires dans le manteau neigeux et de la hauteur de la couche saturée en eau a été introduite dans CROCUS. Une validation (Bouilloud et Martin, 2005) a été faite sur l'ensemble des trois hivers avec des résultats très satisfaisants (Figure 10). L'objectif pour la suite est de valider ce modèle sur d'autres données, puis de tester ses capacités de prévision (sur les données du Col de Porte et à partir des données de prévision SAFRAN sur toute la France de la chaîne opérationnelle SAFRAN-ISBA/Routes).

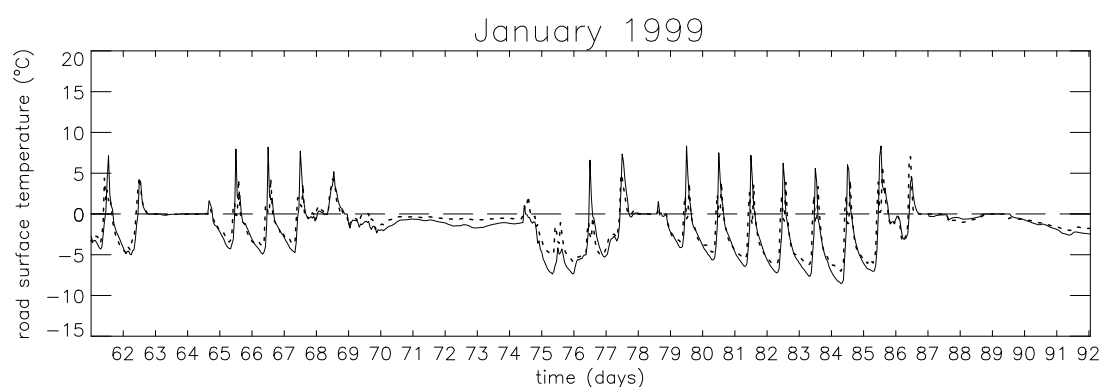
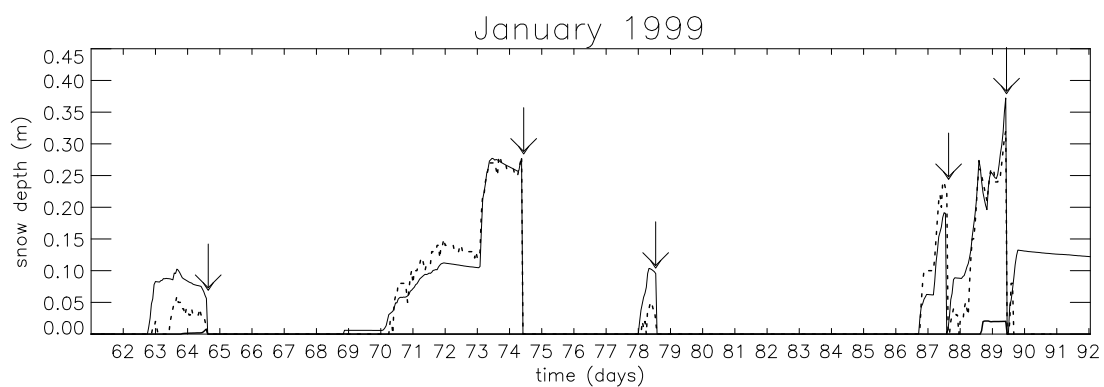


Figure 10 : Haut : Comparaison des données simulées (—) et mesurées (---) de hauteur de neige, avec la hauteur de la couche de neige saturée (—). Les flèches indiquent les déneigements manuels. Bas : température de surface de la route simulée (—) et mesurée (---) (Bouilloud et Martin, 2005).

3 Applications dans le domaine du climat

D'une manière générale, on s'attend à ce que la cryosphère (et en particulier la couverture neigeuse) soit très sensible à un réchauffement général du climat. Mes travaux de recherche se sont principalement concentrés sur les massifs montagneux alpins, compte tenu de la disponibilité au CEN de l'outil d'analyse SAFRAN. La première priorité était de quantifier la réponse du manteau neigeux alpin et pyrénéen à des variations données de paramètres climatiques (température et précipitations). Dans notre cas, il s'agit de modifier les paramètres d'entrée du modèle de neige. Cette action a eu un prolongement naturel avec une étude sur le risque d'avalanche, grâce au modèle expert MEPRA, capable d'analyser la stabilité du manteau neigeux simulé par CROCUS.

Ensuite, il a été évident qu'il fallait s'intéresser aux méthodes de régionalisation, permettant d'utiliser de manière plus appropriée les résultats des modèles de circulation générale. Ces méthodes permettent une prise en compte de certains phénomènes, comme des variations de type de temps. Une méthode de régionalisation par sélection d'analogues a donc été construite, puis utilisée. Ceci a ensuite motivé une activité autour de l'utilisation de différents modèles de circulation générale et des deux réanalyses du Centre européen de prévision météorologiques à moyen terme (CEPMET).

Le troisième axe est constitué par la liaison neige-climat dans les hautes latitudes. Des données de ce type avaient été utilisées dans le cadre de la validation du modèle CROCUS, mais deux thèmes nouveaux ont été abordés. Tout d'abord le couplage de CROCUS avec un modèle de circulation générale, ce qui a permis de simuler l'évolution interne du manteau neigeux de manière interactive avec l'atmosphère sur différentes régions. Ensuite, dans le cadre du projet POLAR SNOW, le modèle CROCUS a fonctionné sur l'Antarctique, avec des forçages du modèle du CEPMET.

3.1 Les travaux sur la sensibilité climatique et la méthode de régionalisation

3.1.1 Etudes de sensibilité

Dans ce cas, à partir d'une simulation de référence (la simulation de la période 1981/1991 par SAFRAN/CROCUS), il s'agissait de modifier les données météorologiques d'entrée de CROCUS et d'observer les différences générées sur les simulations d'enneigement (Martin et al, 1994, Martin, 1995). Cette méthode simple a permis de tirer un certain nombre d'enseignements généraux sur la réponse du manteau neigeux à un changement du climat ou aux variations climatologiques d'une année sur l'autre :

- La durée de l'enneigement est plutôt bien reliée à la température moyenne.
- Les précipitations ont une importance sur la hauteur de neige, plus que sur la durée de l'enneigement
- Les altitudes moyennes (1500-1800 m) sont extrêmement sensibles à une augmentation de la température.
- Il ne suffit pas de « remonter » toutes les conditions d'enneigement en cas d'augmentation de température. Cette solution revient à minimiser les variations en moyenne montagne.

3.1.2 Régionalisation des modèles de circulation générale

Si l'on s'intéresse à des simulations de l'enneigement en montagne les modèles de circulation générale ne peuvent être utilisés tels quels. Il est nécessaire d'interpoler, ou plutôt d'extrapoler leurs résultats à l'altitude désirée, mais cette méthode donne des résultats très grossiers pour une simulation d'enneigement. C'est pourquoi une méthode de régionalisation à partir de situations météorologiques analogues a été utilisée. Cette technique de régionalisation originale était dérivée de techniques utilisées pour les prévisions de précipitations hivernales au CEN, à EDF ainsi qu'au Laboratoire des transferts en hydrologie et environnement (LTHE) dans le cadre de programmes de recherche sur les prévisions de crues sur certains bassins versants. Cette méthode a été développée pendant mes travaux de thèse (Martin, 1995, Martin et al, 1997). Il s'agit d'une méthode par analogues. A chaque journée simulée par le modèle de circulation générale, on associe une journée réelle prise dans une base de données de référence. On utilise une distance définie sur les champs d'altitude du modèle (température et géopotential à 700 et 500 hPa) au voisinage des Alpes. Les avantages de cette méthode sont principalement :

- La prise en compte des particularités locales (inscrites dans la journée de référence).
- La prise en compte des changements de type de temps, de la variabilité de l'atmosphère : plus de circulation d'ouest, d'anticyclones...

Les difficultés ou réserves les plus importantes sont :

- La transmission aux résultats sur l'enneigement des biais du modèle de circulation générale (ce qu'une méthode simple d'anomalie ne fait pas).
- La mauvaise qualité de la méthode en cas de changement important du climat (celle-ci ayant du mal à trouver une journée analogue).

Cette méthode appliquée à deux modèles de circulation générale a montré qu'elle pouvait donner des résultats très cohérents avec les résultats déduits d'autres paramètres (température, type et variabilité de la circulation atmosphérique).

3.2 Etudes de simulations climatiques du climat présent et des réanalyses ERA15 et ERA40

Si la thèse a prouvé l'intérêt de la méthode de régionalisation par analogues pour la simulation du manteau neigeux, il est clair que la qualité de la reconstitution du manteau neigeux dépend directement de la qualité de la simulation climatique. L'examen des simulations utilisées a montré que les champs météorologiques (le géopotential à 700 ou 500 hPa par exemple) au-dessus des Alpes ne ressemblent pas aux champs réels : on retrouve bien des ondes météorologiques, mais en général elle sont très régulières, et on ne trouve qu'extrêmement rarement des situations de blocage, comme des anticyclones. Cette constatation, ainsi que la nécessité de suivre les progrès des modèles de circulation générale nous a poussé à analyser et utiliser des simulations dans le cadre du projet HIRETYCS et des deux réanalyses du CEPMMT.

3.2.1 Le projet HIRETYCS

Le projet européen HIRETYCS (High resolution ten-year climate simulations) a organisé une expérience de type AMIP avec trois modèles en haute résolution (T106 ou équivalent) : ARPEGE (CNRM), HadAM2b (UKMO), ECHAM4 (MPI). Les résultats ont été analysés en les comparant aux observations, aux deux autres modèles, mais aussi avec les simulations en résolution standard (T42). Outre les équipes de modélisateurs, le projet a réuni des

équipes chargées de l'analyse des résultats, soit sur un point particulier (blocages, flux, ...) soit sur une région donnée.

L'analyse préliminaire des champs météorologiques au-dessus des Alpes a montré que les différents modèles pouvaient avoir des biais importants (jusqu'à 1,5°C), ainsi que des circulations atmosphériques assez différentes de la réalité (analyses du CEPMMT) (Figure 11).

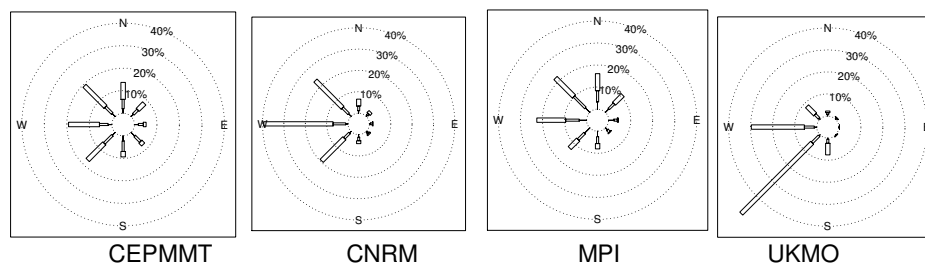


Figure 11 : Rose du vent géostrophique à 700 hPa (novembre mars) pour le point 45°N, 6°E.
De gauche à droite : CEPMMT, CNRM, MPI, UKMO.
Les classes de vitesse sont 0-5 m s⁻¹, 5-10 m s⁻¹, >10 m s⁻¹. (Déqué et al, 1998)

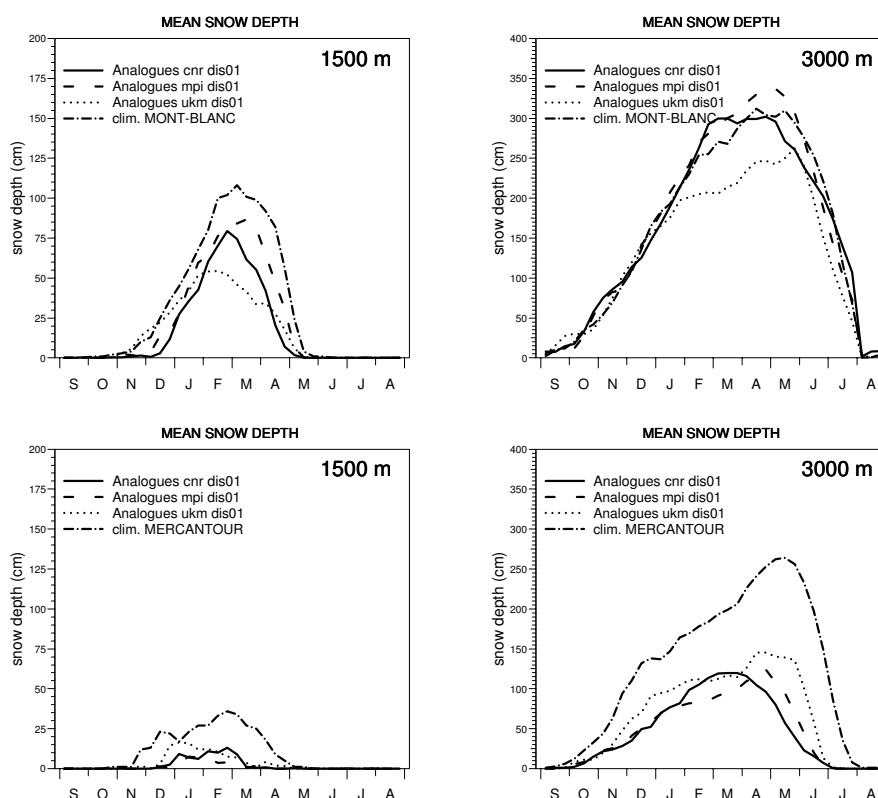


Figure 12 : Hauteur de neige moyenne simulée par la méthode de régionalisation par analogues pour les simulations haute résolution : CNRM (cnr), MPI (mpi) et UKMO (ukm) (Déqué et al, 1998)

Le modèle CNRM est apparu trop zonal, alors que le modèle du UKMO simule des flux de sud ouest étonnamment fréquents. Les conséquences sur la simulation de l'enneigement sont très visibles (Figure 12). Sur le Mercantour (extrême sud des Alpes) l'enneigement est

systématiquement sous-estimé à cause de la mauvaise simulation des champs météorologiques dans cette région (il est vrai que les résultats à 1500 m ne sont pas significatifs, vu le faible enneigement). Pour le massif du Mont-Blanc, les résultats sont meilleurs. Les résultats du UKMO sur ce massif sont les moins bons, car ce modèle simule majoritairement des flux de Sud-ouest, qui arrosent très peu cette région.

Sur une simulation d'une dizaine d'années, la question de la variabilité du manteau neigeux et des précipitations a pu être abordée. Dans le cadre d'HIRETYCS, on a étudié celle de la hauteur de neige maximale à 1500m, altitude particulièrement sensible aux fluctuations météorologiques (Tableau 3 pour le Mont-Blanc). Ce résultat est assez encourageant : grâce au forçage de la température de surface des océans et à la variabilité interne du modèle, il est possible de retrouver une certaine variabilité. Pour les précipitations, c'est le pourcentage de journées de fortes précipitations qui a été comparé entre simulations (via les analogues) et analyses (Martin et al, 1998). Il apparaît que la distribution de quantité de précipitations est assez réaliste sous réserve que le modèle de circulation générale n'ait pas de biais trop importants sur la température et/ou la circulation atmosphérique elle-même (rose des vents). Il est clair que la reconstitution est plus aléatoire pour l'occurrence de fortes précipitations, et en particulier en hiver. Pourtant, il s'avère que l'occurrence de fortes précipitations est cruciale si l'on s'intéresse aux situations avalancheuses.

Tranche de hauteur (cm)	Référence	CNRM	MPI	UKMO
175 – 200	2	3	0	1
150 – 175	3	3	1	0
125 – 150	0	1	4	0
100 – 125	4	2	1	0
75 – 100	0	0	3	4
50 - 75	0	0	0	3

Tableau 3 : nombre d'occurrences d'hiver avec une hauteur de neige maximale dans une tranche donnée (au total 9 hivers) pour le massif du Mont-Blanc. Référence : simulation SAFRAN-CROCUS sur la période 81-90 (d'après Martin et al, 1998).

3.2.2 La validation des réanalyses ERA15 et ERA40

Dans le cadre de ses deux projets de réanalyse, le CEPMMT a associé différents laboratoires pour valider les résultats au plus tôt. Je me suis concentré sur la validation des résultats sur les Alpes françaises (Martin, 1996, 2004). La difficulté de l'exercice était liée au relief de la zone, qui n'est pas reproduite de manière satisfaisante (Figure 13).

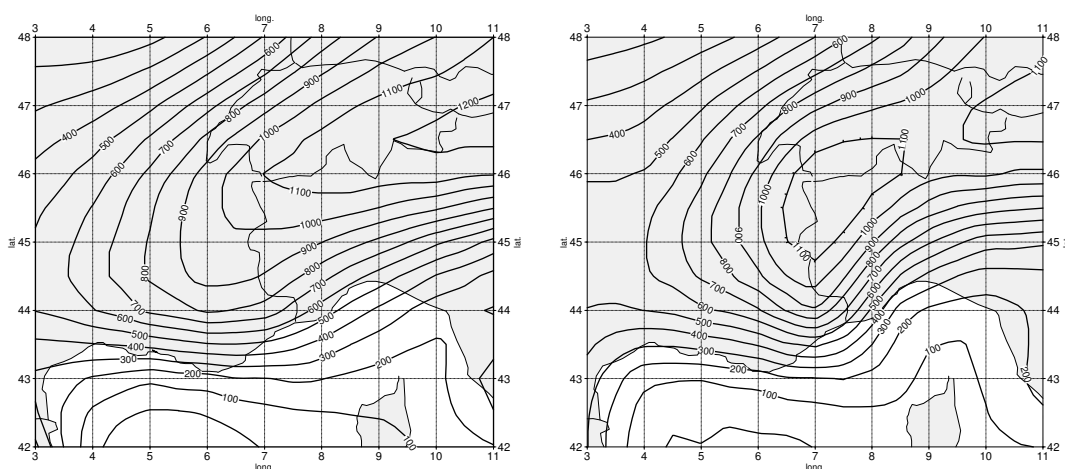


Figure 13 : Relief du modèle dans les réanalyses ERA15 (gauche) et ERA40 (droite) (Martin, 2004).

Dans les deux projets, la température de la station Nivôse Bellecote (3000 m d'altitude) a été très bien simulée (les sorties du modèle ont été simplement interpolées à l'altitude voulue). Concernant les précipitations, les résultats ont été satisfaisants, même si certaines stations situées dans des vallées abritées se sont trouvées moins bien restituées. A noter que le « spin up » sur les précipitations empêche en pratique l'utilisation des précipitations des 12 premières heures de prévision. Enfin, au niveau mensuel, une sous estimation des précipitations pour les mois les plus arrosés a été constatée.

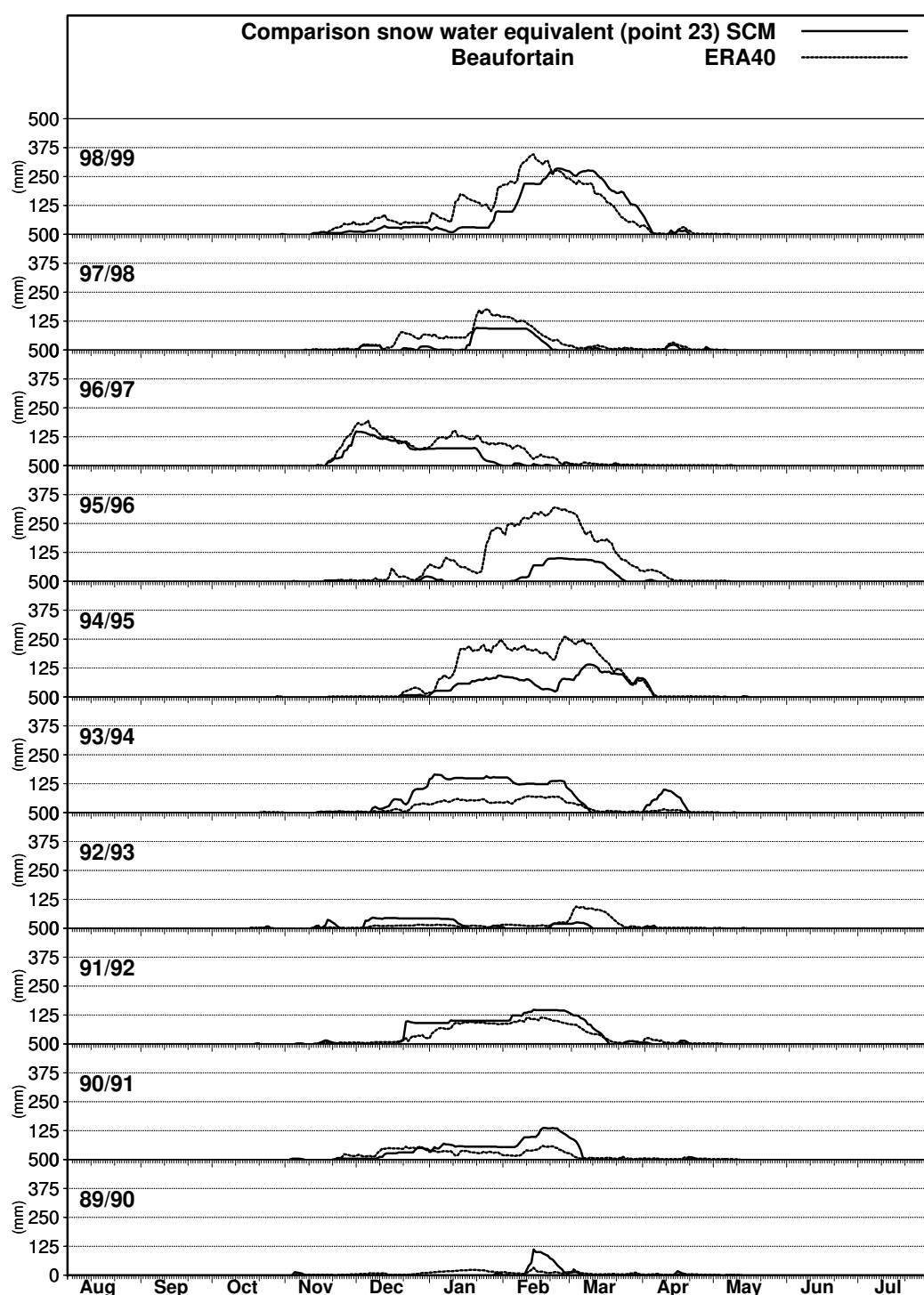


Figure 14 : Comparaison entre l'équivalent en eau simulé par ERA40 (point 46 N, 7°E, 1100 m) et l'analyse SAFRAN-CROCUS pour le massif du Beaufortain (900 m) (Martin, 2004).

La validation a montré la mauvaise qualité de la simulation du manteau neigeux dans la version du modèle utilisée pour ERA15. La prise en compte du manteau neigeux était, à ce moment-là, basée uniquement sur une analyse des chutes de neige et des observations de neige. Les résultats se sont avérés assez mauvais, alors que CROCUS forcé par les données de surface donnait des résultats corrects. Dans le projet ERA40, le manteau neigeux simulé a été comparé aux données SAFRAN-CROCUS avec de bons résultats, confirmant l'intérêt de l'amélioration du schéma de neige du CEPMMT qui avait été introduite dans l'intervalle (Figure 14).

3.3 Un couplage expérimental de CROCUS avec le modèle ARPEGE

Une expérience de couplage du modèle CROCUS avec le modèle ARPEGE a été tentée pour vérifier la faisabilité d'un couplage d'un modèle détaillé de neige avec un modèle de circulation générale (Brun et al, 1997). Il s'agissait d'un réel couplage, comme dans le cas d'un modèle océanique, car il n'était pas possible d'introduire CROCUS directement dans le code du modèle, à cause de la méthode de résolution de la température du modèle, du nombre de couches variable et du traitement dans CROCUS des changements de phase. En cas d'absence de neige, c'est le module de surface, ISBA-OP qui était utilisé, on cas de neige, c'est CROCUS qui calculait l'évolution du manteau neigeux, les propriétés de la surface, et les transferts avec le sol. Le couplage était organisé suivant les étapes suivantes :

1. Calcul des propriétés physiques du sol à partir de celles du sol et du manteau neigeux (données par CROCUS),
2. Calcul par ARPEGE de l'évolution temporelle de la surface et de l'atmosphère,
3. Calcul de l'évolution du manteau neigeux par CROCUS à partir des flux de surface ARPEGE,
4. Mise à jour par ARPEGE du réservoir de neige, de la température et de l'humidité du sol à partir des flux à la base du manteau neigeux calculés par CROCUS.

Deux problèmes ont dû être résolus :

- Le cas des régimes très stables : la température de surface simulée en Antarctique était trop froide (20 à 30 degrés en moins par rapport à la simulation de référence ARPEGE). En effet, le flux de chaleur dans la neige en hiver était trop faible pour réchauffer la surface. Ce phénomène était amplifié par une diminution irréaliste des flux de chaleur sensibles et latents en cas de très grande stabilité atmosphérique. Une correction de la paramétrisation d'ARPEGE a été introduite afin de limiter le nombre de Richardson stable et d'éviter ainsi le découplage entre l'atmosphère et la surface.
- Le transport de neige par le vent : le modèle CROCUS ne tenant pas compte originellement du transport, les densités de la neige se sont avérées bien souvent trop faibles en surface par rapport à la réalité, aggravant le phénomène de refroidissement de la surface. CROCUS simulait des masses volumiques en surface de l'ordre de 100 kg m^{-3} , au lieu de 300 kg m^{-3} observées. Une paramétrisation du transport de neige a été introduite à partir des mesures effectuées par le CEN au col du Lac Blanc, permettant de densifier la neige en fonction de sa qualité et de la vitesse du vent.

Le test a été concluant en ce sens que le modèle couplé a permis de rendre compte de la diversité du manteau neigeux dans les différentes régions du globe sur une simulation test.

3.4 Test de CROCUS en conditions polaires

Ma participation au projet européen POLAR SNOW a permis de tester le modèle CROCUS dans des conditions polaires, domaine où il n'avait pas été utilisé. Le projet rassemblait des modélisateurs et équipes de terrain, dans le but de développer et valider un modèle capable de simuler les propriétés physiques du manteau neigeux à la surface des calottes de l'Antarctique et du Groenland. Le projet s'est appuyé sur les données de forçage facilement disponibles, c'est-à-dire les archives opérationnelles du CEPMMT, les réanalyses ERA15, et les données disponibles à la station de Pôle Sud. Après une étude approfondie à Pôle Sud (Dang et al, 1997), CROCUS a été utilisé pour des simulations sur l'ensemble de l'Antarctique, puis sur le Groenland. Les archives du CEPMMT étant très froides à Pôle Sud, elles ont dû être corrigées en fonction de la température observée sur le site.

Des études de sensibilité sur une année en boucle ont mis en évidence certains points importants (Figure 15) :

- Densité de la neige fraîche : la densité de la neige fraîche dans CROCUS est estimée à partir de la température de l'air et du vent. La formule utilisée habituellement (étalonnée sur les données du col de Porte) donnait des densités trop faibles. La densité a dû être sérieusement augmentée (320 kg m^{-3}) pour obtenir des profils réalistes de densité (on retrouve ici le problème du paragraphe précédent).
- Paramétrisation des métamorphoses : dans le modèle CROCUS, seuls les grains facettés (faces planes ou givre de profondeur) peuvent grossir. Dans le cas de simulations pluriannuelles, il est clair que seuls les grains près de la surface peuvent être soumis à un fort gradient de température, devenir facettés et grossir. Ceci n'est pas cohérent avec les observations in situ. Cette difficulté, qui n'apparaît pas (ou peu) en neige saisonnière a été identifiée, mais non traitée dans le cadre du projet.
- Variabilité des précipitations : c'est grâce à ce paramètre qu'il a été possible de simuler des couches de givre de profondeur et d'obtenir des profils du manteau neigeux cohérents avec ceux observés. Ces couches se forment lorsque une couche de neige est soumise longtemps à un fort gradient de température près de la surface. Ces conditions arrivent plus facilement lors des années sèches.

Les tests menés à Pôle Sud ont été confirmés par des simulations réalisées sur l'ensemble de la calotte antarctique. La relation entre variabilité des précipitations et type ou taille des grains s'est trouvée confirmée (Figure 16). A gauche, la simulation a été effectuée avec l'année 90/91 des archives opérationnelles du CEPMMT, qui est beaucoup plus sèche sur le plateau que la climatologie de Giovinetto et al (1990), alors que la simulation de droite a été calculée avec le jeu de données des 15 années de réanalyses, corrigé en température, et dont les précipitations sont plus conformes à la climatologie

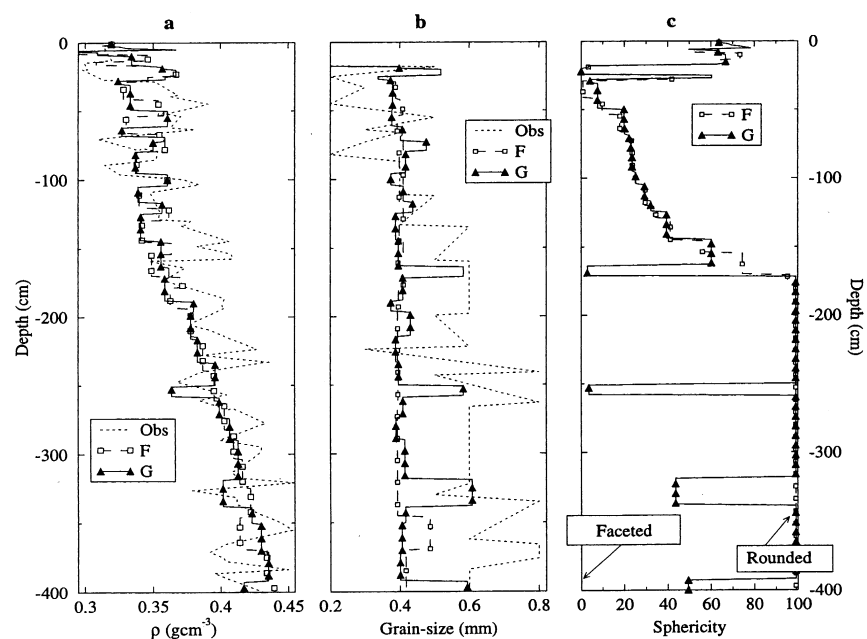


Figure 15 : Profils de densité (a), taille de grains (b), sphéricité des grains (c) pour les simulations F (densité de neige fraîche corrigée) et G (simulation F, avec un cycle de 4 ans sur les précipitations : précipitations multipliées par 1 la première année, puis 0.5, 2 et 0.5). (Dang et al, 1997)

max grain size 2 m year -02-

max grain size 2 m year -12-

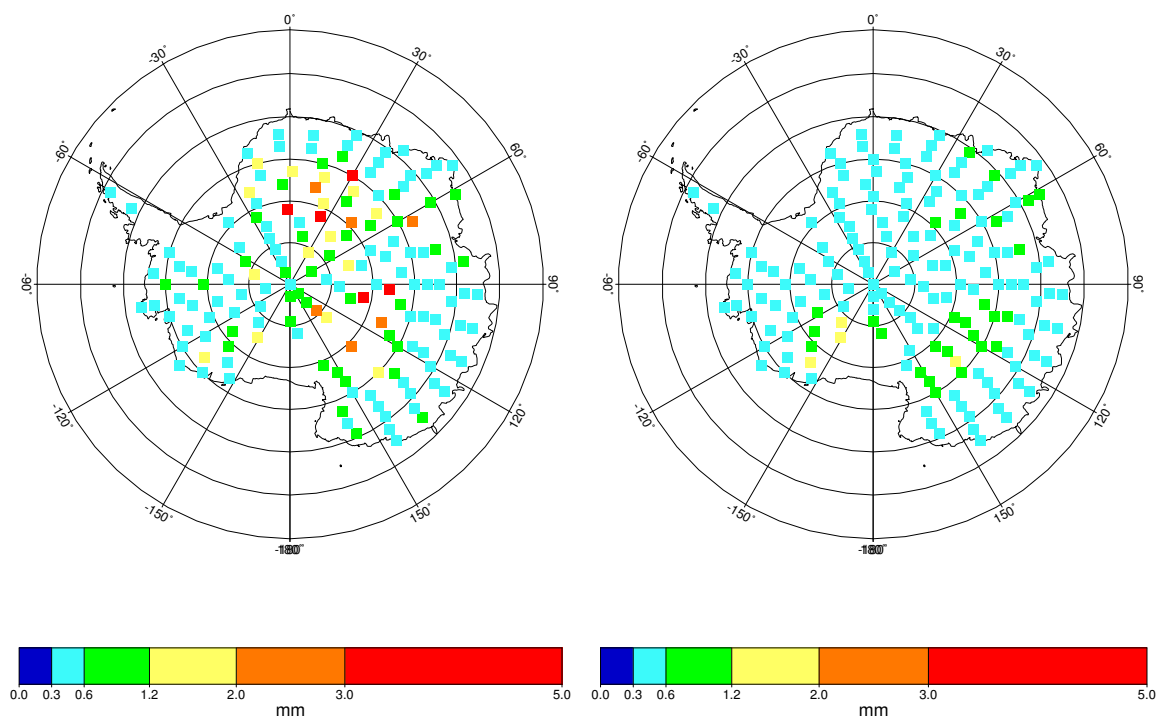


Figure 16 : Taille maximale des grains (mm) sur les 2 premiers mètres du manteau neigeux. A gauche : forçage 90/91 de l'archive du modèle opérationnel du CEPMMT, à droite, forçage à partir des réanalyses ERA15 (Genthon et al, 1998).

3.5 Impact d'un changement climatique sur le risque d'avalanche

Le changement climatique attendu pour les massifs français ayant des conséquences fortes sur l'enneigement, l'activité avalancheuse devrait être également modifiée. Les gestionnaires de risque sont clairement demandeurs de données sur une évolution sur le long terme, sachant que les dispositifs de protection contre les avalanches sont des équipements coûteux, à la fois en investissement et en entretien, et que leur durée de vie est assez longue.

Très peu d'études se sont intéressées au lien entre activité avalancheuse et climat. Une étude suisse (Latarnier et al, 1997) s'est intéressée au XXe siècle à partir de données de neige et d'observations d'avalanches. Les auteurs ont conclu que l'activité avalancheuse était restée stable et que l'effet des mesures de protections devrait probablement cacher un signal climatique futur.

Le système expert MEPRA (Giraud et al, 1993), estimant le type et le niveau de risque d'avalanche à partir d'un profil du manteau neigeux calculé par CROCUS, a permis d'aborder ce sujet d'une manière nouvelle (Martin et al, 2001). Une étude d'impact avec MEPRA était aussi le prolongement naturel de l'étude sur l'enneigement avec CROCUS. On a d'ailleurs utilisé des scénarios climatiques voisins de ceux de Martin et al (1994, 1997) pour montrer la complémentarité avec la première étude.

3.5.1 Un indice d'activité avalancheuse modélisé

S'il était relativement intuitif de comparer une hauteur de neige simulée, même à l'échelle du massif à des hauteurs de neige ponctuelles (avec quelques précautions), l'exercice de validation sur le risque d'avalanche est plus délicat. Le CEN dispose d'un indice d'activité avalancheuse observé, basé sur les observations des avalanches dans les stations du réseau nivométéorologique, et pondéré à l'échelle du massif. Cet indice présente le défaut de ne pouvoir être calculé que si un nombre suffisant d'observations sont disponibles dans le massif (par exemple, en l'absence de visibilité suffisante, l'observation n'est pas possible). MEPRA, de son côté est capable de fournir de nombreuses estimations pour différentes tranches d'altitudes et d'exposition, à une fréquence temporelle assez élevée.

Une comparaison des deux indices a été effectuée sur un hiver pour le massif de la Vanoise (le plus riche en observations nivométéorologiques) (Boudard, 1999). Il a fallu également synthétiser les informations fournies par MEPRA pour garder un indice quotidien (qui varie de 0 à 8). C'est l'indice correspondant au maximum quotidien de la moyenne des risques (entre 1500 et 3000m) par exposition qui est apparu le plus représentatif. Les cas où les deux indices divergent fortement ont été analysés. Dans la plupart des cas, les mauvaises restitutions sont liées à des difficultés d'observations (mauvais temps, brouillard, observation tardive, avalanche attribuée à une mauvaise date). Quelques mauvaises simulations ont été cependant relevées : mauvaise estimation de la limite pluie/neige, ou surestimation du risque d'avalanche de fonte car les modèles ne tiennent pas compte des purges antérieures. Ces cas sont cependant limités.

Si les deux indices varient de manière cohérente, il n'en reste pas moins que l'indice MEPRA est un indice basé sur l'aléa, alors que celui correspondant à l'observation est lié à une activité réelle (mais observée uniquement si le temps le permet). Il faut bien garder à l'esprit la différence de définition. Ainsi, pour une situation avalancheuse de printemps, il est clair que l'indice MEPRA va rester élevé plusieurs jours de suite alors que les pentes se seront déjà purgées et que l'activité avalancheuse réelle sera extrêmement réduite.

3.5.2 Des scénarios pour le risque d'avalanche

D'une façon similaire à ce qui a été fait pour l'enneigement, une climatologie de référence a été calculée et des scénarios climatiques ont été simulés. Compte tenu des difficultés d'interprétation de l'indice et des incertitudes sur les scénarios régionalisés à partir des modèles de circulation générale, seuls des scénarios de type « anomalie » ont été utilisés. Trois scénarios (2 partiels et un complet) ont été étudiés :

- augmentation de température de 1.8°C (T)
- augmentation de précipitation de 10% (P)
- augmentation de température et de précipitation (PT)

La Figure 17 indique l'évolution de l'indice moyen entre novembre et juin pour deux scénarios dans le Mont-Blanc. Le maximum de l'indice de référence est observé en février et un second maximum est observé en mai, associé aux avalanches de fonte. Dans le scénario complet (PT) l'indice partiel pour les avalanches de neige humide augmente systématiquement (sauf en mai et juin car la durée de l'enneigement est réduite), alors que l'indice partiel pour les avalanches de neige récente diminue. L'indice total diminue, sauf en mars, mais finalement ces variations restent faibles, si on les compare aux variations quotidiennes observées. La diminution la plus forte est observée en mai et juin car la période des avalanches de neige humide est avancée. L'évolution des événements extrêmes suit l'évolution des paramètres moyens, ceux-ci ont donc plutôt tendance à diminuer dans le cadre des scénarios T et PT.

Même si les résultats sont à prendre avec précaution à cause des limites de l'indice (l'activité avalancheuse est un paramètre qui ne se mesure pas) il faut plutôt s'attendre à une diminution des avalanches de neige récente (celles qui ont la plus grande extension et sont potentiellement les plus dangereuses), et à une augmentation des avalanches de neige humide janvier à avril.

Ce type d'étude gagnerait en crédibilité si elle bénéficiait de scénarios climatiques régionalisés comprenant des indications sur les phénomènes extrêmes. L'analyse de la situation avalancheuse de février 1999 (Ancey et al, 2000) dans les Alpes a mis en évidence qu'une situation de crue avalancheuse se produisait si trois facteurs étaient réunis :

- Des chutes de neige abondantes,
- Des températures froides,
- Une chute de neige intense, servant en quelque sorte de détonateur.

Ce n'est donc que si l'on peut avoir une estimation de la probabilité d'occurrence commune de ces trois paramètres que nous pourrions donner une information sur la fréquence des situations extrêmes dans le futur.

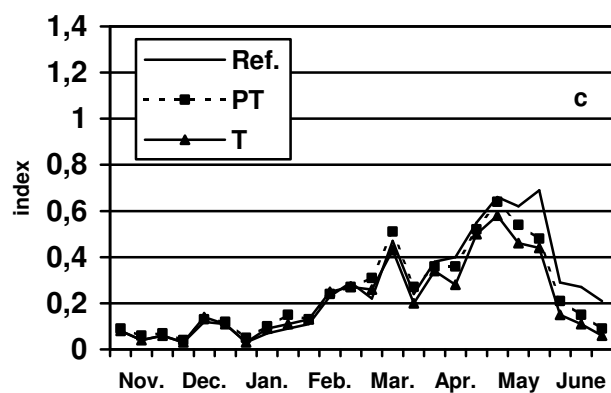
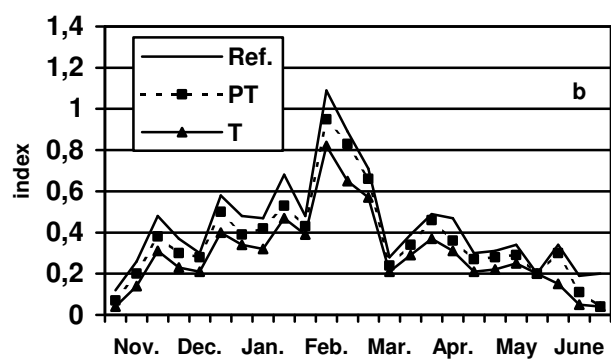
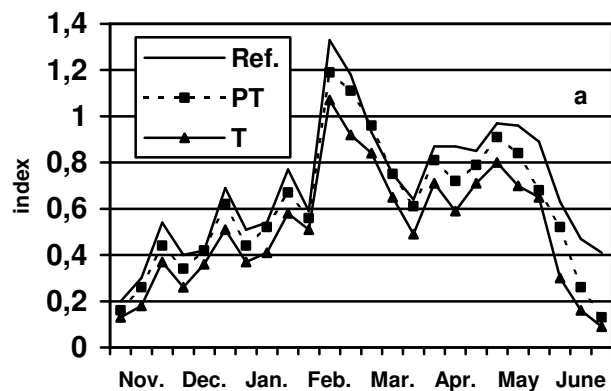


Figure 17 : Moyenne décadaire de l'indice d'activité avalancheuse sur 15 ans dans le massif du Mont-Blanc pour la simulation de référence et les scénarios PT et T.
a) indice complet, b) indice correspondant aux avalanches de neige récente,
c) indice correspondant aux avalanches de fonte (Martin et al, 2001).

4 Applications dans le domaine de l'hydrologie

Le manteau neigeux joue un rôle hydrologique important dans les montagnes des zones tempérées, puisqu'il stocke une partie des précipitations hivernales. Cette eau est « libérée » au moment de la fonte de neige qui est gouvernée par le bilan énergétique de surface, et principalement le rayonnement solaire. L'influence du manteau neigeux se retrouve donc :

- Dans le régime des fleuves : ceux qui ont une composante nivale ont un pic de débit marqué au printemps, l'étiage estival dépendant de la présence de glaciers sur le bassin versant.
- Sur le régime des crues : les crues d'origine nivale présentent des variations de débit progressives (au contraire des crues rapides ayant une origine orageuse). En cas de fortes précipitations en saison froide, les précipitations tombent rarement sous forme de pluie sur l'ensemble du bassin, c'est donc un facteur limitant.
- Sur la ressource en eau : sur un sol enneigé, l'évapotranspiration est négligeable. Au printemps c'est même plutôt de la condensation solide qui est observée sur le manteau neigeux. Ainsi, c'est la totalité des précipitations qui est disponible pour l'écoulement.

Les outils de modélisation du manteau neigeux (SAFRAN et CROCUS) ont été testés dans différentes conditions afin d'en mesurer l'intérêt, par comparaison aux modèles hydrologiques déjà existants. Une première étude a été menée au Centre d'études de la neige par Ludwig Braun (alors à l'ETH Zurich) lors de son séjour en tant que visiteur scientifique (Braun et al, 1994). Le modèle hydrologique ETH-HBV a été utilisé avec différentes données d'entrée sur le bassin de la Romanche. Ainsi, les données d'entrée simples du modèle (précipitation, température) ont été remplacées progressivement par des données météorologiques analysées par SAFRAN. La fonte du manteau neigeux, initialement calculée par des méthodes d'index a été ensuite fournie par CROCUS. Cette étude a permis de corriger certains défauts de l'analyse de rayonnement de SAFRAN, de tester l'influence de la variabilité du manteau neigeux avec CROCUS et d'assurer une validation de l'ensemble par les débits. Les résultats des simulations avec SAFRAN-CROCUS se sont trouvées très proches, et même meilleures dans certains cas, des résultats du modèle conceptuel, ce qui est un très bon résultat.

Mon implication dans le domaine de l'hydrologie s'est poursuivie dans le cadre général du projet GEWEX-Rhône (Ottlé et al, 1999), contribution française au programme international sur l'étude du cycle de l'eau. Ce programme, soutenu par le PNRH, visait à construire un modèle couplé basé sur le modèle de surface ISBA (Noilhan et Planton, 1989) et le modèle hydrologique MODCOU (Ledoux et al, 1980) sur le bassin du Rhône. Ce bassin avait été choisi pour sa forte hétérogénéité spatiale et parce que sa couverture neigeuse réagirait fortement en cas de réchauffement climatique. Dans le cadre de ce projet, SAFRAN a été utilisé pour fournir les données météorologiques d'entrée, et CROCUS a été couplé à ISBA pour simuler l'évolution du manteau neigeux. Ce programme réunissait au départ le CETP, le CIG/ENSMP, le Cémagref et le CNRM. Il a été poursuivi ensuite dans le cadre d'un programme GICC et a été élargi à de nouvelles équipes.

Ne sont reprises ici que les parties de travaux auxquelles j'ai le plus contribué. Il s'agit tout d'abord d'une étude sur un bassin versant de haute montagne (Sarennes), qui a permis de tester le couplage SAFRAN-CROCUS-MODCOU et de discuter du rôle de la neige dans les

crues. Ensuite, dans le cadre du projet général Rhône, c'est l'impact de la résolution, puis celui du changement climatique qui ont été étudiés.

4.1 Le projet Sarennes

Dans la stratégie mise en place dans le cadre du projet GEWEX-Rhône, le projet Sarennes a permis un premier test du couplage atmosphère-hydrologie avec les outils SAFRAN-CROCUS-MODCOU. Il devait aussi répondre à la question scientifique du rôle aggravant ou modérateur de la neige dans les crues.

4.1.1 Le bassin versant de Sarennes

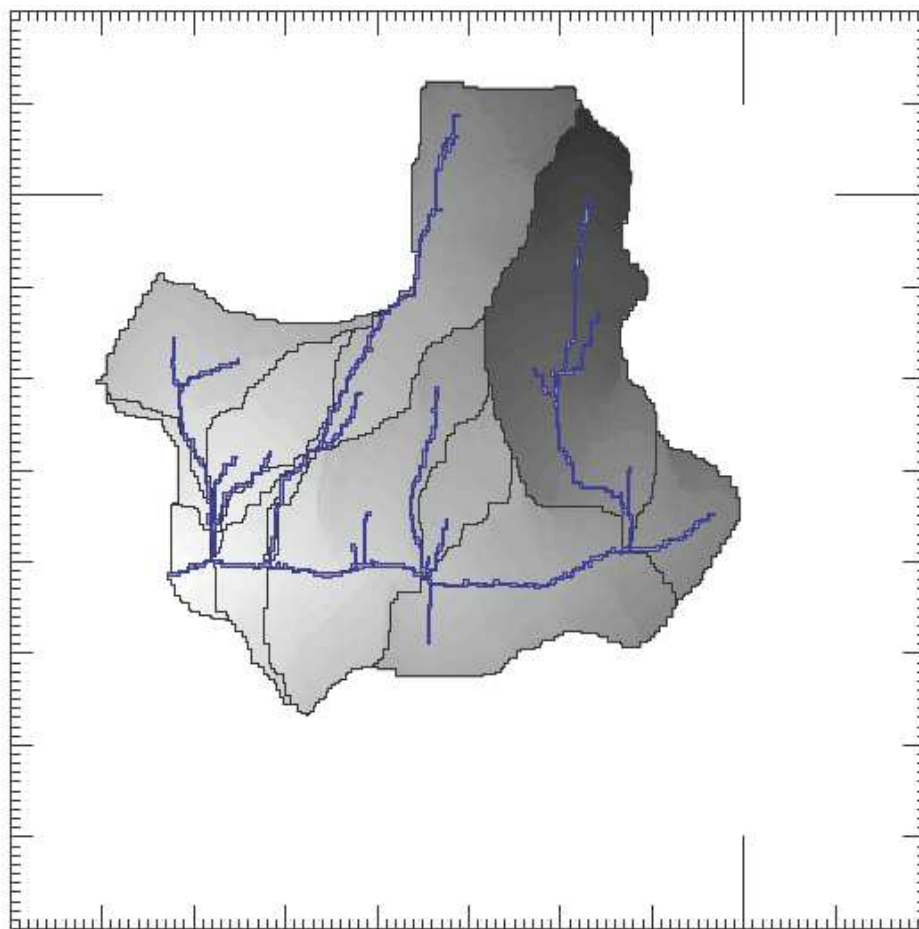


Figure 18 : Bassin versant de Sarennes : réseau hydrographique, sous-bassins et distance à l'exutoire (Martin et al, 1997)

Le bassin versant de Sarennes (exutoire à Sarennes-les-Moulins, Figure 18), est un petit bassin versant de 28 km², avec des altitudes variant de 1400 à 3300 m. Il possède quelques glaciers (1 km² au total) dont le glacier de Sarennes (0.5 km²), qui est suivi depuis plusieurs dizaines d'années. Il est situé sur le domaine skiable de la station de l'Alpe d'Huez et subit des influences anthropiques directes : un petit canal (canal des Sarrasins) prélève de l'eau sur le bassin à des fins d'irrigation pour un village voisin (débit faible), les eaux usées et certaines eaux d'écoulement sont acheminées vers une station d'épuration située en dehors

du bassin (60 mm/an rapportés au bassin). Trois stations de mesures de débit sont installées. La plus ancienne est celle placée à l'exutoire du bassin (Sarennes-les-Moulins, gestion EDF). Les deux autres ont été placées sur la rivière Sarennes (à 2750 m sous le glacier) et à 2200 m (gestion Cémagref). D'un point de vue géographique, le bassin est clairement coupé en deux par la barrière des Grandes Rousses, isolant la combe de Sarennes, à l'est, de la zone des Petites Rousses et du plateau de l'Alpe d'Huez.

4.1.2 Adaptation de SAFRAN-CROCUS et couplage avec MODCOU

Le système d'analyse SAFRAN a été utilisé sans modifications. L'ensemble du bassin est en fait contenu dans une seule zone d'analyse (massif « Grandes Rousses »). Les seules sources de variabilité des paramètres météorologiques dans l'analyse sont donc l'altitude, l'orientation et la pente. Le modèle CROCUS, par contre a dû être adapté pour simuler le glacier. Les modifications introduites ont été les suivantes :

- Introduction de couches de glace à la base du manteau neigeux (prises comme étant de la neige à 917 kg m^{-3} . Certaines lois physiques (conduction, tassement) ont été adaptées en conséquence.
- Introduction d'un albédo fixe lorsque les couches de glace sont en surface.
- Augmentation des flux turbulents lorsque la glace est en surface
- Diminution du flux thermique du sol. Les valeurs habituelles de l'ordre de quelques W m^{-2} sont justifiées lorsque le sol peut emmagasiner de la chaleur pendant l'été, mais ce n'est évidemment pas le cas du glacier de Sarennes. Le flux habituellement utilisé a été divisé par 100, ce qui correspond à une fonte à la base négligeable.

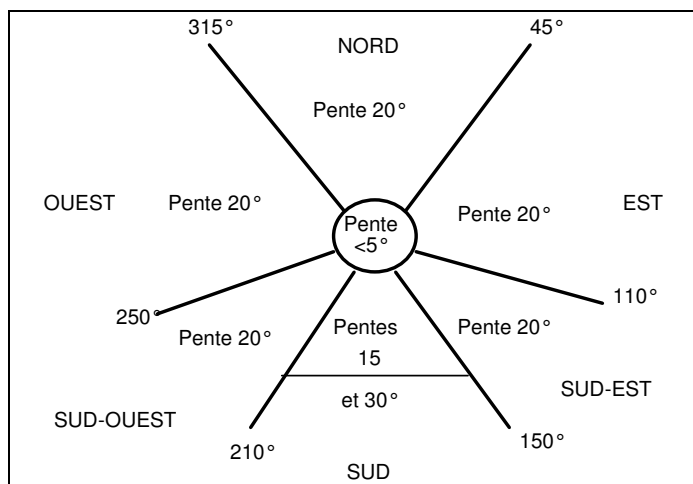


Figure 19 : Découpage en pente/ exposition pour chaque altitude utilisé pour forcer le modèle MODCOU

Le modèle MODCOU a été mis en place par le Cémagref avec l'aide du CIG/ENMSP, à partir d'un relief à 200 m de résolution relevé sur une carte IGN. Les mailles de bases étaient de 25 m de côté avant agrégation des mailles voisines semblables. Plusieurs simulations de CROCUS ont été faites, par pas de 300 m d'altitude, pour différentes orientations et pentes, tel que résumé par la Figure 19. De plus, pour les altitudes 3000 et 3300 m, les simulations ont été faites avec et sans glacier. Ces simulations de CROCUS ont été complétées par un calcul d'ETP selon la formule proposée par Choissnel (1988). Dans ce projet, c'est la version de MODCOU avec fonctions de production qui a été utilisée. Le forçage pour chaque maille a été attribué selon l'appartenance de la maille à une classe d'altitude-pente-orientation. Une seule fonction de production a été utilisée pour l'ensemble du bassin versant.

4.1.3 Le bilan de masse du glacier de Sarennes

Les mesures disponibles pour la validation étaient l'accumulation, l'ablation et le bilan annuel. Sachant que cette étude était la première étude menée avec CROCUS sur un glacier, des mesures classiques par sondage du manteau neigeux ont été réalisés en supplément en janvier et juin. Les premières validations sur l'accumulation ont montré que l'analyse SAFRAN sous estimait les précipitations et qu'il fallait multiplier les lames d'eau SAFRAN par 1.8 pour obtenir une accumulation correcte. Cette valeur très forte peut apparaître surprenante, mais elle est due à la forte hétérogénéité météorologique du bassin liée à la présence de la barrière des Grandes-Rousses. L'accumulation supérieure dans cette zone s'explique par la configuration en cirque du relief (qui interagit probablement avec la circulation atmosphérique locale), le transport de neige par le vent, voire l'arrivée d'avalanches sur le glacier. Il est hors de portée de SAFRAN de reproduire ceci, en l'absence d'informations pertinentes. D'autre part, il faut noter que les lames d'eau simulées par SAFRAN sont conformes aux observations sur la partie ouest du bassin. Les calages ont ensuite été effectués sur la période d'ablation, ce qui a permis d'ajuster les paramètres du modèle sur les points évoqués au paragraphe précédent (Martin et al, 1996).

Une vue synoptique des simulations est donnée dans la Figure 20. Le résultat est relativement satisfaisant, même si l'ablation simulée est trop forte pour l'été 1982 et trop faible pour l'été 1989. En particulier la simulation reproduit bien le seul cycle avec un bilan positif (1994/95). Sur les paramètres moyens, l'accumulation légèrement trop faible est compensée en partie par une ablation également faible, ce qui donne un bilan global tout à fait satisfaisant.

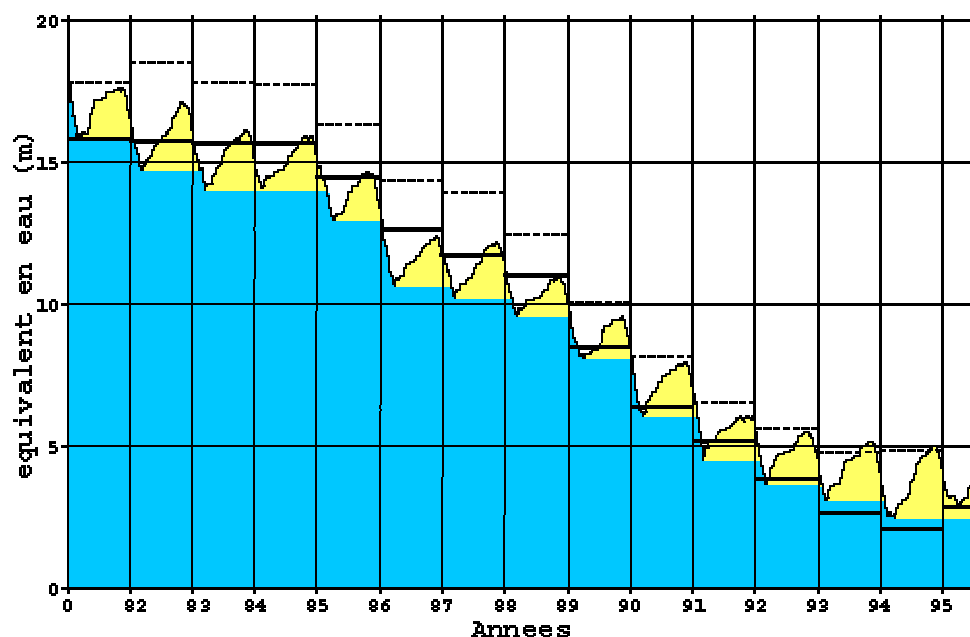


Figure 20 : Bilan de masse simulé du glacier de Sarennes (été 1981 à fin 1995). La glace est représentée en bleu, la neige saisonnière en jaune. Les barres horizontales correspondent aux mesures : limite de la neige et de la glace (traits continus) et maximum d'accumulation (traits pointillés) (Martin et al, 1997).

4.1.4 Le rôle de la neige dans les crues

Une des questions scientifiques du projet était la détermination du rôle de la neige dans les crues. Les épisodes ayant donné lieu soit à des forts débits (au moins $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en moyenne sur une journée), soit à des fortes précipitations (au moins 50 mm sur une des journées) ont été sélectionnés. Pour les débits, on a utilisé la chronique des débits observés à Sarennes-les-Moulins, pour les précipitations, c'est l'analyse SAFRAN qui a été utilisée. Sur 14 ans (août 1981, juillet 1995), 34 épisodes ont été sélectionnés. La Figure 21 montre de manière synthétique la relation entre l'écoulement (pluie+fonte du manteau neigeux) et les débits. L'analyse montre que les débits les plus forts sont associés à des épisodes de fonte, avec ou sans précipitations. Les épisodes de crue liés uniquement à des précipitations présentent un débit plus faible. Enfin, sans surprise, un nombre important d'épisodes de fortes précipitations n'engendre pas de réponse en débit (lorsqu'il s'agit de chutes de neige).

Ainsi, la plupart des crues de la rivière Sarennes sont d'origine nivale ou pluvio-nivale. La condition primordiale pour que la rivière atteigne le seuil de débit de crue consiste tout d'abord en la présence de neige sur une grande partie du bassin versant. Ce stock neigeux doit être soumis, et ceci durant plusieurs jours à une fonte intense occasionnant la saturation des sols. Cette condition préalable étant remplie, toute augmentation des lames d'eau d'écoulement (intensification de la fonte ou pluie) sur des sols très sensibles à tout apport d'eau peut provoquer la crue. En revanche, lorsque le bassin n'est enneigé que dans sa partie haute, il paraît difficile d'obtenir une crue importante, même avec des fortes précipitations.

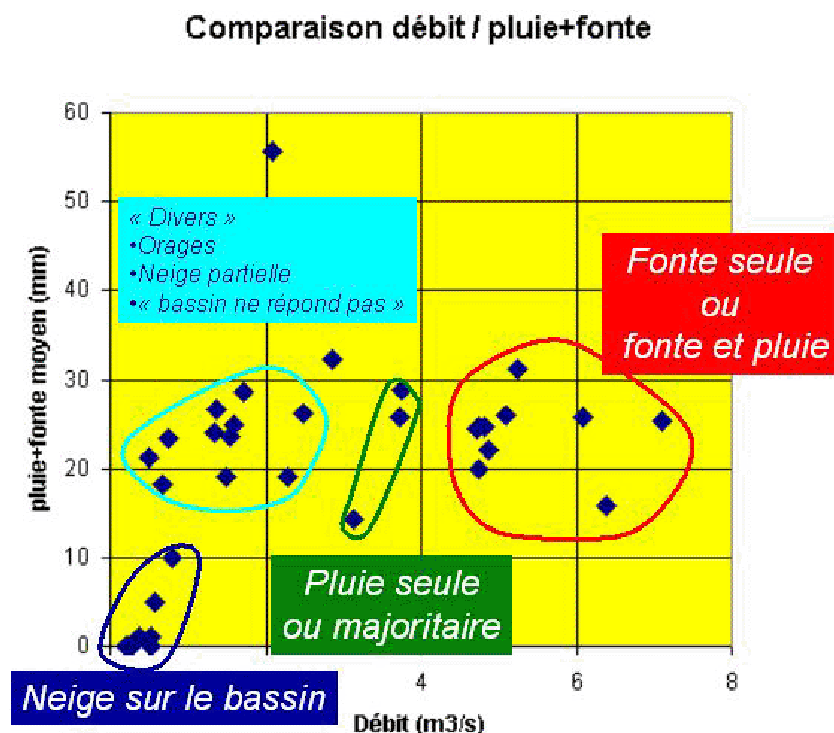


Figure 21 : Relation écoulement moyen / débit moyen pour les 34 épisodes retenus. Ecoulement : pluie + fonte du manteau neigeux. Débit : débit à l'exutoire (Sarennes-les-Moulins) (Martin et al, 1997). Sont indiquées sur la figure les interprétations tirées de l'analyse complète des données.

Le rôle de la neige a été abordé également grâce à la modélisation hydrologique en comparant les débits de la rivière dans la configuration actuelle et dans une modélisation

« sans neige ». Pour cette dernière simulation, on a considéré que l'ensemble des précipitations tombait sous forme de pluie (les valeurs d'ETP précédemment calculées n'étant pas modifiées). On observe (Figure 22) un débit moyen plus régulier sur l'année, avec une variabilité accrue l'hiver et l'automne. Ceci montre d'une autre façon le rôle modérateur de la neige sur les crues d'automne et d'hiver. Dans le scénario « sans neige », les débits mensuels moyens sont certes moins variables, mais au niveau journalier les débits de pointe sont systématiquement augmentés. Ces conclusions sont valables pour les bassins versants de montagne ayant un caractère nival marqué. Sur des bassins plus bas, il est clair que l'apparition épisodique de neige est un facteur aggravant, celle-ci pouvant fondre lors d'un épisode de redoux avec pluies intenses, ceci augmentant d'autant le débit des rivières.

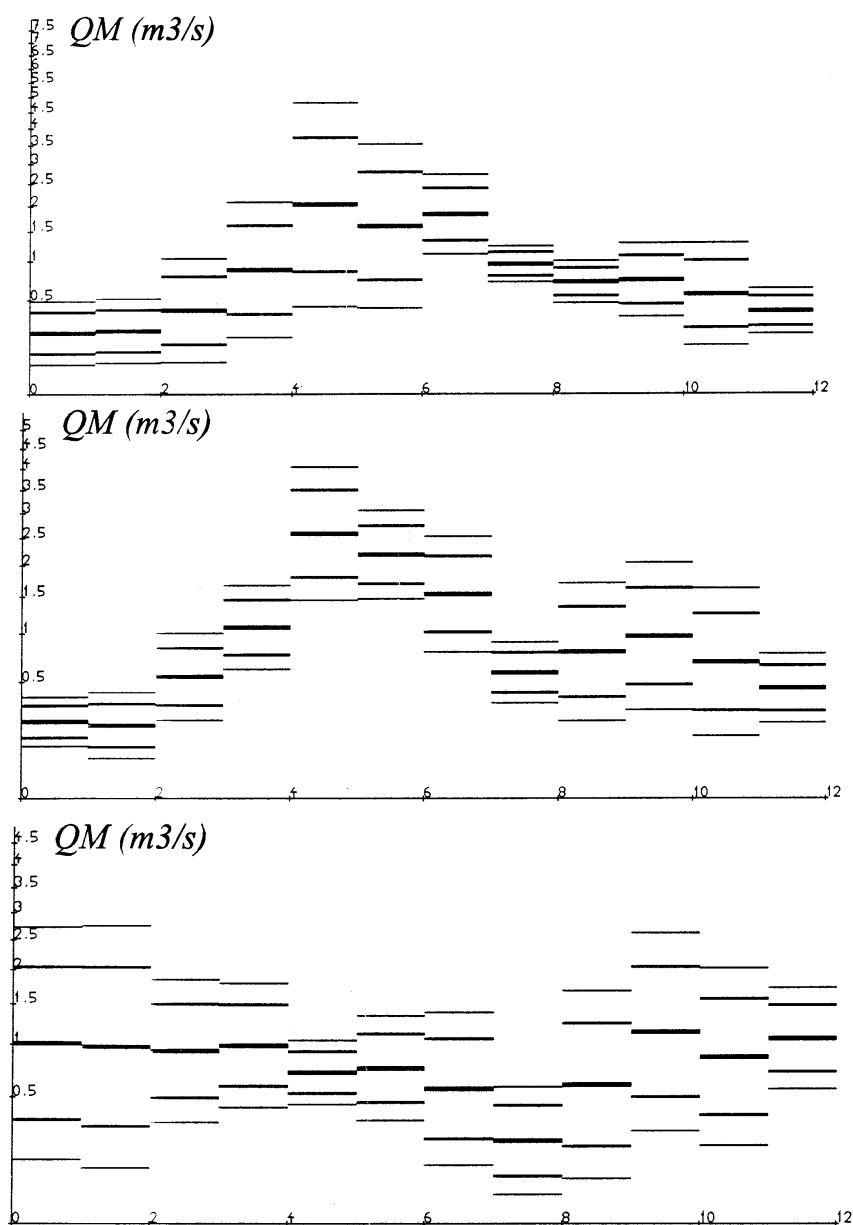


Figure 22 : Débit mensuel ($m^3 s^{-1}$) de la rivière Sarennes. En haut : chronique observée, milieu : chronique reconstituée par SAFRAN-CROCUS-MODCOU, bas : scénario « sans neige ». Trait gras : débit moyen. Autres traits (de haut en bas) : débit dépassé une année sur dix, une année sur cinq, puis symétrique pour les deux courbes du dessous (Martin et al, 1997).

4.1.5 L'étude hydrologique du bassin versant de Sarnnes grâce à TOPMODEL

Katia Durot (1999) dans le cadre de sa thèse au LTHE que j'ai co-encadrée a utilisé les données SAFRAN-CROCUS en entrée du modèle hydrologique TOPMODEL pour simuler plus particulièrement la période de fonte (mai à juillet). Elle a comparé en particulier 3 versions du modèle :

- TOPMODEL : la version classique, avec une lame d'eau en entrée unique,
- TOPBAND : une version semi-distribuée, développée dans le cadre de cette thèse : on essaie de « coller » au mieux à la variation de la lame d'eau de fonte avec l'altitude. Le bassin versant total est découpé en sous-bassins (de 1 à 3) et la lame d'eau est uniforme sur chacun d'entre eux ; le découpage en sous-bassins est réévalué chaque jour en fonction de la lame d'eau de fonte,
- TOPODYN, qui accepte une lame d'eau distribuée.

Par rapport à la version de base TOPMODEL, TOPBAND améliore les épisodes où la fonte est bien tranchée selon l'altitude. TOPODYN apparaît comme donnant les résultats les plus réguliers, quel que soit le type d'événements (fonte nivale ou pluie).

Katia Durot a également effectué une validation de CROCUS à partir de photographies régulières en période de fonte, permettant de séparer zones enneigées et zones découvertes. Les photos ont montré que l'enneigement disparaît en général trop tard dans la simulation. L'autre point important mis en évidence est le rôle de la redistribution de neige par le vent. Certaines parties peu enneigées se découvrent rapidement au début de la période de fonte. La production d'eau de fonte est à peu près proportionnelle à la surface couverte de neige. Elle a donc tendance à diminuer lorsque les zones se dégagent de neige. Ceci n'est pas reproduit par CROCUS, et logiquement les débits simulés sont trop faibles en début de la période de fonte et trop fort à la fin de la période. A noter que ce problème était déjà apparu lors des simulations sur le bassin versant de la Romanche par L. Braun. Il avait été décidé alors de prendre en compte la variabilité de la hauteur de neige en multipliant les simulations CROCUS, chaque simulation correspondant à des zones peu, moyennement ou très enneigées.

4.2 L'étude sur le bassin du Rhône

4.2.1 La construction du modèle

Le Rhône est le fleuve français qui a le débit moyen le plus élevé ($1700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Sa source se situe en Suisse (Glacier du Rhône), et sa longueur totale est de 810 km environ. Le projet n'a étudié que la partie française du bassin : le débit à Pougny (à l'aval immédiat de Genève) est imposé (soit 20% du débit total à Beaucaire). Le seul aquifère modélisé est celui de la vallée du Rhône et de la Saône. La surface occupée par l'aquifère est de 18812 km^2 , soit 20% environ de la surface totale du bassin simulé (86496 km^2). La maille de base du modèle hydrologique est de 1 km^2 . Ces mailles peuvent être agrégées avec d'autres mailles voisines si elles présentent des caractéristiques semblables. Compte-tenu des données disponibles, on a retenu pour ISBA un maillage uniforme de 8 km. Les données de sol et de végétation proviennent de l'INRA pour les sols, de la base Corine et d'une archive de deux ans de données satellites AVHRR/NDVI index pour la végétation. Les données de routage et de l'aquifère ont été déduites de la topographie et d'un étalonnage à partir des données observées de débit (Golaz, 1999).

La construction est le fruit des travaux de Florence Habets (1999a, 1999b), Catherine Golaz (1999) et Pierre Etchevers (2000, 2001). Dans une première étape, Catherine Golaz a mis en place la modélisation hydrologique du bassin versant du Rhône, puis effectué des longues simulations en utilisant MODCOU dans sa version originale (fonctions de

production), et a fait des tests de sensibilité au forçage météorologique. Florence Habets a mis en place le couplage ISBA-MODCOU sur le bassin versant de l'Adour, amélioré ISBA (drainage sous maille), validé le couplage grâce aux données HAPEX MOBILHY, puis transporté le couplage sur le bassin du Rhône sur la même période et effectué des tests de sensibilité à la taille du maillage. Pierre Etchevers a adapté l'analyse SAFRAN pour la faire fonctionner à l'échelle du bassin versant du Rhône, puis a effectué une simulation longue (14 ans) avec SAFRAN-CROCUS-ISBA-MODCOU, étudié en détail le bassin de la Durance et effectué des simulations avec un climat modifié.

Le projet a abouti à la simulation distribuée pour 14 années du cycle hydrologique (incluant le cycle diurne) du bassin du Rhône, avec une bonne simulation des débits des principaux bassins versants. Cet effort a été valorisé par de nombreux travaux ultérieurs, comme des études d'impact du changement climatique. Après le projet, la modélisation a été étendue à la Garonne, puis à la Seine, et enfin à l'ensemble de la France. Fin 2003, le système SAFRAN-ISBA-MODCOU a été mis en œuvre opérationnellement par la Direction de la climatologie de Météo-France. Cette chaîne fonctionne maintenant quotidiennement, une quarantaine de paramètres de surface sont archivés, ainsi que de nombreux débits simulés.

4.2.2 Etude sur la Haute-Durance

La mise en place de SAFRAN-CROCUS-ISBA-MODCOU a permis de faire de nombreuses études dérivées. ISBA étant un modèle de surface utilisé en prévision numérique et dans les modèles de circulation générale, il était intéressant de tester la sensibilité des résultats obtenus à la taille de la maille du module de surface, jusqu'à des tailles de maille du même ordre de grandeur que celle des modèles de circulation générale. Florence Habets (1999b) a effectué un test d'agrégation en utilisant des mailles de 128 km de côté (ordre de grandeur des mailles d'un modèle de circulation générale). Il a été nécessaire de modifier la température critique de fonte de la neige en fonction du relief sous maille, ainsi que la fraction maximale de neige pour simuler de manière réaliste l'équivalent en eau de la neige, l'évaporation et l'écoulement.

Dans l'étude sur la Haute-Durance (Etchevers et al, 2001), on a cherché à raffiner la maille jusqu'à 1 km pour mesurer l'impact sur les débits de la Durance. Le bassin de la Haute-Durance (exutoire : La Clapière, soit 2170 km²) est le plus grand bassin des Alpes qui ne soit pas perturbé par un grand barrage réservoir. Vu l'altitude moyenne élevée (2150 m) la rivière présente un caractère nival très marqué. On a comparé ici la simulation de référence (maille 8 km) à une simulation fine (maille 1 km) et pour mémoire à une simulation où l'ensemble du bassin versant était regroupé (maille équivalente de 46 km). Pour la simulation à 1 km, on a adapté le forçage SAFRAN en utilisant des gradients verticaux de précipitation issus de la version de SAFRAN utilisée pour la prévision du risque d'avalanche.

Dans ce cas, l'augmentation de la résolution a un effet notable sur la bonne simulation du pic de fonte (Figure 23). La plus grande variabilité du relief dans la simulation haute résolution a pour effet de « lisser » les pics de fonte. Le critère de Nash est nettement amélioré à Briançon aval, la station la plus haute (de 0,08 à 0,61), et est important à La Clapière (de 0,72 à 0,80). La lame d'eau annuelle restant pratiquement inchangée, l'effet de l'augmentation de résolution réside donc dans une amélioration de la simulation du manteau neigeux (prise en compte de la neige sur les sommets) et de la forme des hydrogrammes. Les autres termes du bilan hydrique sont peu sensibles à la résolution.

Pour ce qui concerne la neige, il est cependant peu probable qu'une augmentation supplémentaire de résolution améliore de façon mécanique les simulations. Le critère de Nash est en effet déjà très satisfaisant à une résolution de 1km. Pour aller au-delà, il faudrait probablement s'intéresser à la répartition spatiale du manteau neigeux (comme l'a souligné Katia Durot dans son étude sur Sarennes) ou l'interaction entre neige et forêt. Une part

importante du bassin est en effet couverte de forêts ; Katia Durot a montré sur des données du Col de Porte que l'on pouvait simuler de manière relativement satisfaisante l'évolution d'un manteau neigeux sous un couvert forestier moyennant une adaptation des données météorologiques d'entrée. Enfin, il est aussi possible d'améliorer la simulation hydrologique en prenant en compte les nappes existantes.

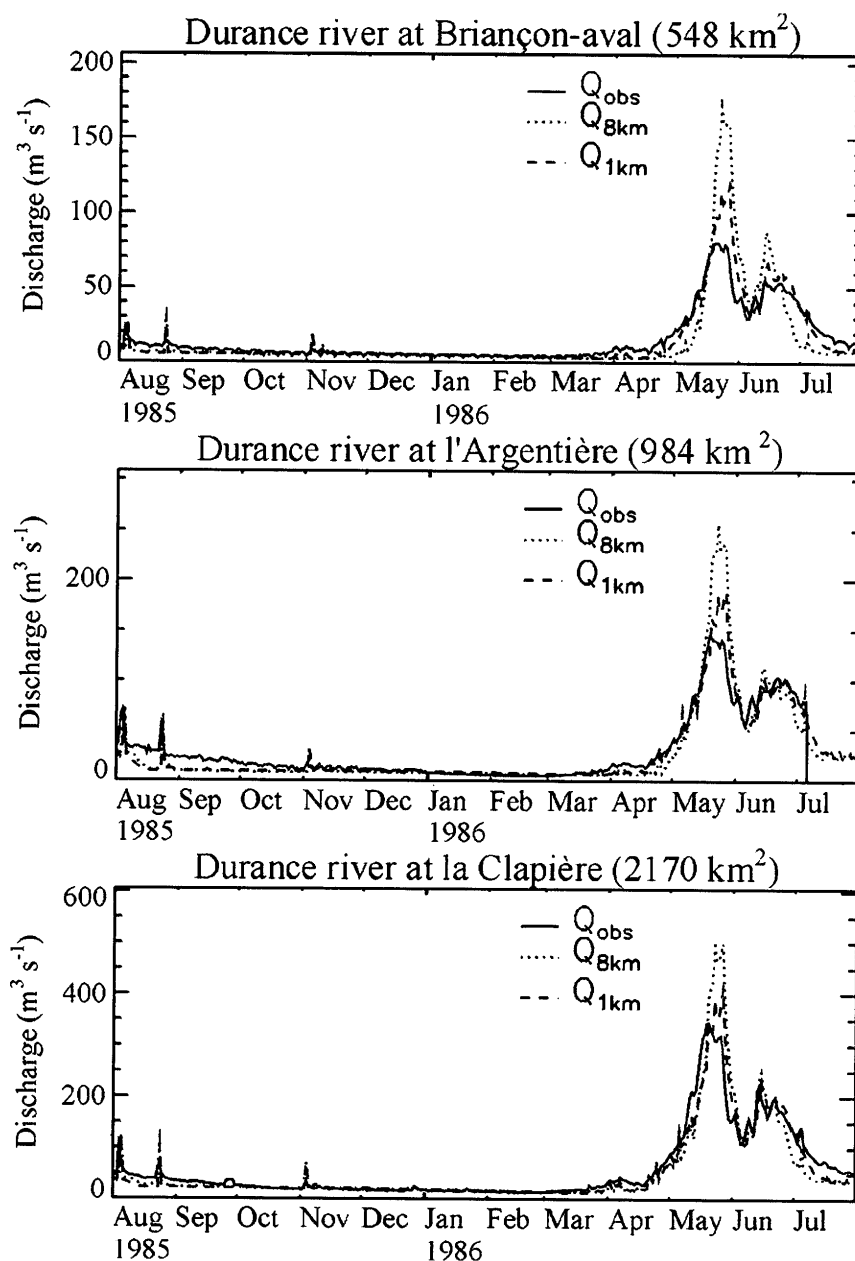


Figure 23: Débit quotidien de la Durance à La Clapière et deux stations de mesures intermédiaires (1985/1986). Observation et simulation pour des mailles de 1 et 8 km de côté (Etchevers et al, 2001)

La dégradation de la simulation de l'enneigement avec l'augmentation de la taille de la maille a été confirmée par l'intercomparaison « Rhône agrégation » (Boone et al, 2004). 15 modèles de surface ont été comparés sur la bassin du Rhône, à la grille 8km x 8km, puis avec des grilles plus lâches (jusqu'à 1° x 1°). Cette expérience a aussi montré la supériorité des paramétrisations explicites du manteau neigeux, c'est-à-dire celle qui distinguent les

propriétés de la neige et du sol. Par rapport aux schémas implicites, l'albédo est plus réaliste (moins élevé), de même que les propriétés thermiques du sol. Les schémas explicites permettent aussi de tenir compte du regel de l'eau liquide dans la neige, qui influe sur la date de fonte du manteau neigeux (voir les discussions correspondantes dans la partie modélisation du manteau neigeux).

4.2.3 Impact d'un changement climatique sur le bassin versant du Rhône

Une première étude d'impact (Etchevers et al, 2002) a été menée en introduisant des perturbations mensuelles fixes interpolées à partir d'une simulation « doublement de CO₂ » (Déqué et Marquet, 1997) aux paramètres d'entrée des modèles, d'une manière similaire aux premières études sur le manteau neigeux. Elle a été complétée par des études de sensibilité à des variations fixées des précipitations et de la température. Des variations significatives des débits des rivières ont été trouvées (augmentation au nord, en liaison avec l'augmentation des précipitations hivernales, diminution dans le sud du bassin, en liaison avec l'assèchement des sols et les faibles précipitations). Les rivières à régime nival sont particulièrement touchées : le manteau neigeux est diminué, l'évaporation augmente fortement. Le pic de fonte est avancé et le débit annuel moyen diminue.

Dans le cadre du projet GICC/Rhône une nouvelle étude a été effectuée (Boone et al, 2000, Noilhan et al, 2001). Six scénarios « doublement de CO₂ » ont été utilisés pour évaluer l'impact d'un changement climatique sur l'hydrologie nivale de certains bassins à caractère nival. L'étude de plusieurs scénarios permet d'intégrer dans une certaine mesure les incertitudes liées à l'utilisation des modèles de circulation générale et au scénario climatique. Quatre modèles ont été utilisés (CNRM : Centre national de recherches météorologiques, HC : Hadley Centre, LMD : Laboratoire de météorologie dynamique, UR : Université de Reading) dont deux ont fourni des scénarios à basse (LR) et haute (HR) résolution. Des anomalies mensuelles ont été utilisées. Pour ce qui concerne la température, les anomalies obtenues sont assez voisines : le réchauffement est en général fort en décembre (2°C environ) et modéré de janvier à avril (de 1 à 2°C). L'anomalie mensuelle de précipitations est en général positive pendant les mois d'hiver, avec des valeurs comprises entre 0 et 25 % (de 20 à 50 % pour CNRM.HR). Etant donné l'augmentation de la température de l'air, l'augmentation des précipitations totales ne se traduit pas par une augmentation des précipitations neigeuses, comme le montre le Tableau 4 pour les bassins de l'Isère et de la Haute Durance.

Bassin versant		CNRM.LR	LMD.LR	HC.LR	UR.LR	CNRM.HR	LMD.HR
Isère	PT	14	2	9	24	28	-5
	PS	-18	-22	-29	-17	-17	-39
Haute Durance	PT	14	2	9	24	24	-2
	PS	-11	-13	-20	-7	-4	-28

Tableau 4 : anomalies (relatives au climat actuel, en %) des précipitations totales (PT) et solides (PS) pour les mois de décembre, janvier, février et mars sur les bassins versants de l'Isère et de la Haute Durance.

L'évolution de l'enneigement ne montre pas de différences notables par rapport aux scénarios décrits dans la première partie de ce mémoire : impact important à basse et moyenne altitude, effet moins important à haute altitude en hiver. Sur l'ensemble du bassin versant, l'impact sur les régions de basse et moyenne altitude a un effet important sur la surface enneigée. La réduction est particulièrement marquée aux mois de janvier et février,

où elle est comprise entre 6000 et 10000 km² suivant les scénarios (pour une valeur moyenne de 24000 km² pour le climat actuel, soit 29% du bassin versant du Rhône).

Pour le bassin versant de l'Isère, grand bassin versant des Alpes du nord, l'accumulation maximale neigeuse est réduite de 30 à 50 %, avec une disparition quasi-complète pendant les mois d'été. Le maximum est atteint un peu plus tôt (au mois de mars au lieu du mois d'avril). L'évolution mensuelle du manteau est identique pour la plupart des scénarios, sauf les plus extrêmes (LMD.HR et HC.LR). Le débit augmente en hiver, en liaison avec l'augmentation des précipitations et un décalage du pic de fonte de 1 mois. Ce dernier étant moins important, l'amplitude des débits printaniers est réduite pour la plupart des scénarios (de 0 à 15 %). La réduction la plus notable est celle du mois de juillet (environ 50 %), sous l'effet conjugué de l'augmentation de l'évaporation et de la disparition totale de la neige (plus d'effet réservoir). A l'échelle annuelle, les débits augmentent légèrement pour les 3 scénarios où l'anomalie de précipitations est la plus forte et décroissent de 5 à 24 % pour les autres (Tableau 5).

Bassin versant	CNRM.LR	LMD.LR	HC.LR	UR.LR	CNRM.HR	LMD.HR
Isère à St-Gervais	2	-7	-6	11	0	-24
Durance à la Clap.	2	-8	-6	7	-10	-20
Doubs à Courclavon	1	-9	-10	11	5	-22

Tableau 5 : évolution du débit annuel moyen par rapport au climat actuel (%).

L'impact du réchauffement sur le manteau neigeux du bassin de la Haute-Durance (Figure 24) est identique à celui des rivières plus au nord, avec cependant une réduction moins forte en raison de l'altitude moyenne plus élevée. Le débit annuel décroît plus sensiblement que dans les Alpes du nord (de 0 à 20% suivant les scénarios). Les débits augmentent nettement en automne et en hiver et diminuent sensiblement en été. Les forts débits printaniers se produisent un mois plus tôt, leur amplitude restant inchangée pour certains scénarios et diminuant de 10 à 25 % pour d'autres.

Enfin, pour le Doubs (rivière de moyenne montagne), le manteau neigeux moyen sur le bassin est fortement réduit (l'amplitude maximale décroît de 75 mm à moins de 30 mm). Le régime de la rivière perd son caractère pluvio-nival (maximums répartis uniformément entre décembre et mai sous l'effet des pluies hivernales et de la fonte du manteau neigeux) et est entièrement dominé par le régime des précipitations : forte augmentation des débits en décembre et janvier, diminution au printemps. Globalement, le débit annuel moyen augmente pour la moitié des scénarios (de 1 à 11 %), et diminue sinon (de 9 à 22 %).

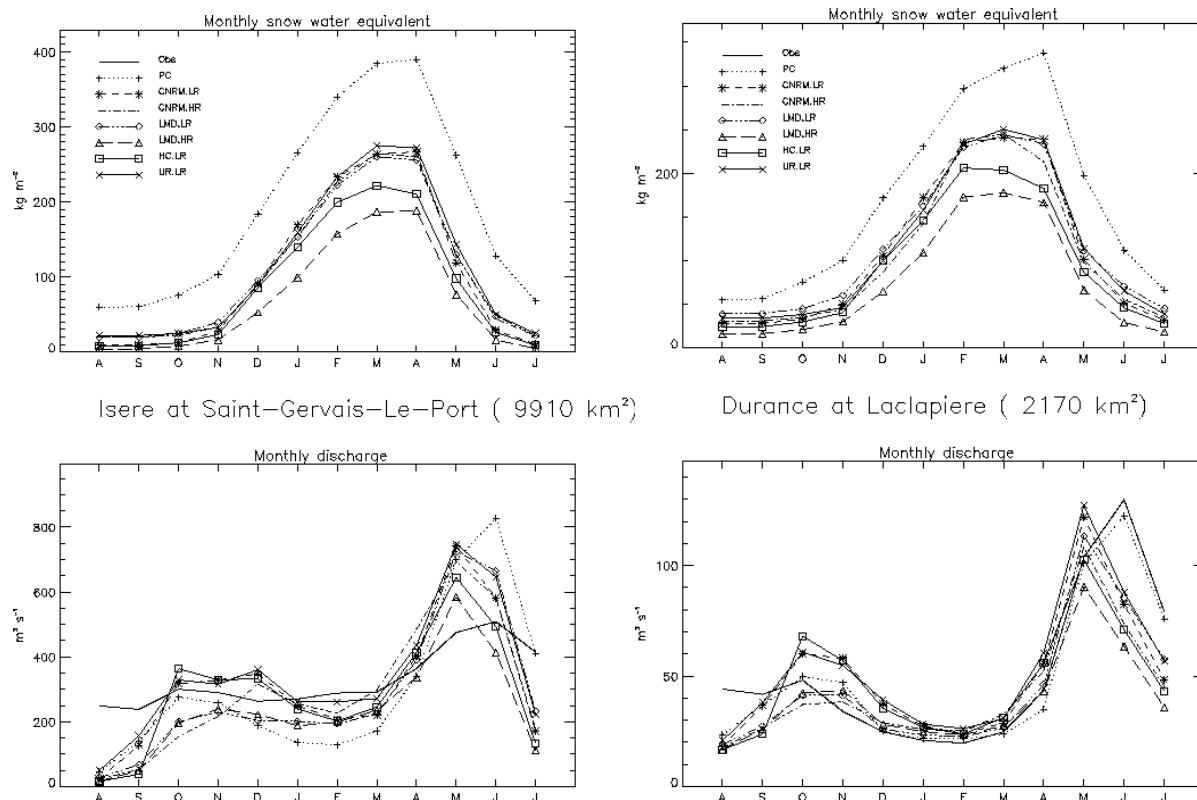


Figure 24 : Evolution du manteau neigeux et débits moyens mensuels sur les bassins de l'Isère à Saint Gervais le Port et la Durance à la Clapière. Obs : observation (débits seulement), PC : climat actuel, le reste : six scénarios climatiques. A noter que pour le bassin de l'Isère, la simulation de référence est très éloignée de l'observation, en raison de la présence de nombreux barrages.

5 Conclusion et perspectives

L'ensemble des travaux présentés ici a contribué à l'amélioration des outils de modélisation du manteau neigeux, ainsi qu'à l'élargissement du domaine d'application de ces outils.

Dans le domaine de la modélisation du manteau neigeux, ces travaux ont permis d'améliorer et de faire connaître les outils de modélisation du CEN. Le modèle CROCUS est devenu ainsi un modèle de référence. Le formalisme de description des types de neige proposé par Brun et al (1992) est devenu un standard et a été repris. CROCUS fait toujours partie des meilleurs modèles du manteau neigeux détaillés, avec de nombreuses applications dans des domaines très variés. Les différentes expérimentations ont permis de mieux documenter les échanges turbulents au-dessus de la surface de la neige (à défaut de trouver une paramétrisation « universelle », qui est probablement illusoire). L'organisation de l'intercomparaison SnowMIP a permis de montrer un lien entre complexité et qualité des simulations. Concernant l'albédo, l'intercomparaison a montré que des paramétrisations basées uniquement sur l'âge ne donnaient pas de bons résultats. L'importance de la représentation de la teneur en eau de rétention a été également démontrée : un décalage de 10 jours a ainsi été mis en évidence sur le début de la période de fonte sur le site du Weissfluhjoch. En revanche, l'intercomparaison n'a pas permis de conclure sur le ratio entre flux turbulents et flux solaire. Ce ratio est en effet très variable d'un modèle à l'autre, sans que l'effet sur les simulations ne sorte du « bruit ». Enfin, le couplage CROCUS-ISBA/routes a prouvé sa robustesse dans les conditions particulières de la neige déposée sur une route (manteau neigeux peu épais et flux de chaleurs importants), et a été validé avec les données de la campagne GELCRO du Col de Porte.

Les efforts d'amélioration et de validation des modèles du manteau neigeux doivent se poursuivre. Il s'agit là de tâches de fond :

- *Concernant le modèle CROCUS*, on peut citer comme amélioration possible les lois de conduction (certains résultats récents peuvent venir compléter les formules déjà anciennes présentes dans le modèle), l'introduction des remontées capillaires et des couches saturées (travaux de l'équipe microstructure du CEN et de Ludovic Bouilloud, en thèse au CEN). De même, les travaux de l'équipe microstructure du manteau neigeux sur la métamorphose pourront dans un avenir proche être intégrés dans les lois de CROCUS. Certaines lois, comme celles du grossissement lent des grains fins, font défaut (étude sur la neige polaire). Les effets de seuils des lois de grossissement posent parfois des problèmes, surtout pour l'analyse des risques d'avalanche. De même, comme l'a montré Katia Durot, l'introduction d'une loi de percolation avec des vitesses de percolation réalistes s'avère nécessaire pour des applications hydrologiques avec un pas de temps fin. Dans le domaine des flux turbulents, la campagne de mesures récente menée sur le glacier Zongo en Bolivie (à laquelle participait Yves Lejeune, en thèse au CEN) devrait permettre de documenter la couche limite sur la neige dans des conditions de haute altitude. Enfin, il faudra veiller à la validation des améliorations apportées au modèle dans le cadre de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA, l'expérience montrant qu'une modification sur l'un des modules peut avoir un impact sur les résultats des autres modules. On imagine bien que la modification de la métamorphose va avoir un impact assez fort sur le fonctionnement de MEPRA et dans la gestion du transport de neige par le vent avec le module SYTRON. CROCUS pourra continuer à être utilisé comme modèle de référence pour construire des paramétrisations plus simple, d'une façon analogue à ce qui a été fait pour ISBA-D95 et ISBA-ES.

- *L'intercomparaison de modèle de neige SnowMIP2*, coordonnée par Richard Essery, va ouvrir de nouvelles possibilités de validation et d'intercomparaison de modèles de neige. Trois sites forestiers seront utilisés dans cette deuxième phase. Pour chaque site, on disposera d'un site sous couvert et d'un site dégagé. Cette intercomparaison sera une opportunité de tester les modèles d'évolution du manteau neigeux sur de nouveaux jeux de données. Il semble nécessaire qu'ISBA participe à cette intercomparaison. Pour CROCUS, ce sera l'occasion de tester le module de neige sous forêt développé par Katia Durot.
- *Enfin, le couplage CROCUS-ISBA/Routes* devra être testé dans des conditions proches du fonctionnement opérationnel de la chaîne SAFRAN-ISBA/Routes (chaîne fonctionnant actuellement quotidiennement à Météo-France). Le couplage thermique et hydrique entre CROCUS et un modèle de sol pourrait d'ailleurs être utilement repris dans la chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA pour améliorer la simulation du flux thermique du sol, qui est actuellement paramétrisé de façon très simple. Ceci améliorerait grandement la simulation du manteau neigeux à l'automne.

Dans le domaine du climat, le développement de SAFRAN a ouvert de nombreuses possibilités pour la modélisation du manteau neigeux dans les Alpes et les Pyrénées, incluant sa variabilité avec l'altitude ou le massif. Ainsi, des études d'impact climatique sur l'enneigement ont pu être conduites. Celles-ci ont montré la forte sensibilité du manteau neigeux à toute augmentation de la température. C'est aux moyennes altitudes (1500, 1800 m) que l'impact est le plus fort : perte d'un mois d'enneigement pour une augmentation de température de 2°C. L'examen de la série climatologique du Col de Porte depuis le début des années 60 (réalisé d'ailleurs après ces travaux) a validé ces résultats : la tendance des températures hivernales sur ce site a été de +2°C pour une diminution de la durée de l'enneigement d'un mois environ.

La méthode de régionalisation par analogues s'est trouvée très adaptée pour reconstituer la variabilité spatiale du manteau neigeux au niveau des Alpes. On a pu ainsi reproduire des particularités locales très fortes : les vallées sèches des Alpes du sud (Queyras, Ubaye), la décroissance des précipitations entre les Pré-Alpes et les massifs de l'est. Les deux scénarios climatiques étudiés ont bien montré le lien entre la variation locale de la circulation atmosphérique et les variations du manteau neigeux. L'utilisation de la méthode de régionalisation pourrait être envisagée à partir de nouvelles simulations, à la condition que le climat des scénarios climatiques ne soit « pas trop différents » du climat actuel. Dans le cas contraire, la méthode des analogues conduit à une minimisation de l'impact. L'utilisation de la méthode de régionalisation sur des réanalyses ou des simulations du climat présent a permis de voir qu'il était possible de simuler grâce à des modèles de circulation générale la variabilité du manteau neigeux. Les tests de CROCUS couplé avec le modèle ARPEGE ou sur l'Antarctique en mode forcé ont montré la potentialité du modèle à reproduire la stratification du manteau neigeux dans différentes zones climatiques.

Dans ce domaine, les futures recherches devraient améliorer l'acquis des travaux précédents, et approfondir les études d'impact. Les thèmes suivants pourraient être abordés :

- *La connaissance de la climatologie nivale actuelle* : le travail récent de Martin Laternser (visiteur scientifique au CEN en 2004) de reconstitution de la climatologie nivale depuis 1958 à l'aide de SAFRAN et CROCUS ouvre de nombreuses perspectives. On peut penser en tout premier lieu à la détection de tendances sur les séries temporelles. Il serait également aussi très intéressant de documenter les

épisodes avalancheux exceptionnels du passé (pour les Alpes : 1999, 1995, 1981, 1970, ...). L'indice naturel quotidien de risque d'avalanche calculé par MEPRA permet un bon diagnostic de ces périodes. Le croisement des informations relatives aux périodes avalancheuses à partir de la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA (en terme de conditions météorologiques, de stratification du manteau neigeux et de risque d'avalanche), des observations d'avalanche de l'enquête permanente sur les avalanches (gérée par le Cémagref) et d'autres sources de renseignements disponibles permettraient de documenter de manière précise ces événements. Ces informations seraient particulièrement utiles pour les décideurs locaux, à la fois pour les aspects prévention et gestion de la crise.

- *La reproduction des extrêmes et de la variabilité dans les études d'impact* : il s'agit d'un point crucial si l'on s'intéresse aux situations avalancheuses exceptionnelles. Les études menées suite à la situation exceptionnelle de février 1999 ont montré que ces situations nécessitent les conjonctions de températures froides, de cumuls importants de chutes de neige et d'une chute de neige particulièrement intense. Idéalement, c'est cette conjonction qu'il faudrait rechercher pour déterminer, à partir d'un scénario climatique, la variation de l'occurrence des événements avalancheux exceptionnels. La variabilité interannuelle est aussi à prendre en compte pour les études d'impact, que ce soit pour la gestion des ressources en eau ou les sports d'hiver. Une réflexion sur les périodes et paramètres critiques à retenir devrait être menée. Les simulations actuelles du climat permettent de s'intéresser aux phénomènes extrêmes (projet IMFREX du GICC par exemple), ce qui ouvre des perspectives intéressantes. Le projet RIVAGES (restitution de la variabilité des régimes hydrologiques à partir des scénarios climatiques), en collaboration avec le CERFACS et l'UMR Sysiphe a aussi pour objectif une amélioration des forçages météorologiques pour les modèles hydrologiques (ce point sera repris plus loin).
- *Développer les études d'impacts* : au niveau des massifs français, en plus du réalisme du scénario climatique en terme de variabilité, l'avenir des études d'impact passe par une intégration plus forte des conséquences. Il devient nécessaire maintenant de prendre en compte l'impact économique sur les stations de ski, qui devient une préoccupation des collectivités locales, auxquelles sont adressées régulièrement des demandes d'aide. Le Conseil général de l'Isère, avec l'aide d'un bureau d'études, d'informations du CEN et du Centre départemental de la Météorologie a défini récemment une politique vis-à-vis des différentes stations du département. Des tentatives par le passé de nouer le contact avec des équipes spécialisées en économie n'ont pas abouti, mais cette piste ne doit pas être abandonnée. La question de l'avenir des canons à neige mérite également d'être abordée. En France, 15% des domaines skiables sont enneigés artificiellement et les investissements continuent d'être importants. Deux actions pourraient être effectuées dans ce domaine au sujet de la potentialité climatique d'enneigement artificiel (sans tenir compte des problèmes liés aux ressources en eau et à l'influence sur la végétation). La première serait de déterminer la potentialité de production de neige pour un équipement « moyen » en fonction du climat local avec la chaîne SAFRAN-CROCUS-MEPRA (une ancienne équipe grenobloise du CNRS avait travaillé dans ce domaine à partir d'observations et avait effectué des études pour certaines stations). La deuxième serait d'évaluer leur évolution et de l'intégrer dans des études économiques des stations de sport d'hiver.

L'effort fait avec l'IRD sur les mesures météorologiques et d'enneigement dans la partie haute du bassin versant du Rio Zongo en Bolivie (thèse en cours d'Yves Lejeune au CEN) permettent d'envisager des études d'impact sur cette zone. L'enjeu est en effet important, puisque les ressources en eau de la ville de La Paz reposent en partie sur ce bassin versant. Il reste à faire un lien entre le climat à grande échelle

(par exemple à partir des réanalyses du CEPMMT) et le climat local du bassin avant de pouvoir envisager l'étude d'impact climatique en tant que telle. A noter que ces travaux en cours déboucheront aussi sur une meilleure connaissance de la météorologie et de l'hydrologie locale, ainsi que du bilan de surface du manteau neigeux et du glacier dans des conditions climatiques peu simulées par les modèles de surface.

L'extension des études d'impact aux glaciers est une perspective intéressante pour les modèles du CEN. Un travail est actuellement en cours en collaboration avec le LGGE (Thèse de Martin Gerbaux au LGGE). SAFRAN-CROCUS pourrait aider à déterminer l'évolution de la ligne d'équilibre des glaciers en fonction du réchauffement.

Les travaux en hydrologie, structurés principalement par le projet GEWEX-Rhône et ses suites ont favorisé l'émergence de collaborations avec des laboratoires spécialisés en hydrologie et ont permis le développement de l'outil SAFRAN-ISBA-MODCOU. Il s'agit d'une avancée très forte dans le domaine de la modélisation hydrologique. On dispose maintenant d'un outil capable de simuler le bilan d'eau et d'énergie du sol de manière distribuée, sur l'ensemble de la France (fonctionnant en temps réel depuis fin 2003).

Pour ce qui concerne les travaux plus directement liés à la neige, l'outil a été utilisé pour discuter le rôle de la neige dans les crues à l'aide de l'exemple du bassin versant de Sarennes. Les modèles ont permis de traiter le cas d'école du bassin soumis aux mêmes précipitations sous forme de pluie. Il est clair que pour ce type de bassin, la neige diminue fortement le risque de crues éclairs, particulièrement en automne. La plupart des crues sont d'ailleurs liées à la fonte du manteau neigeux. L'étude sur la Haute-Durance montre que la résolution de 8 km n'est pas suffisante pour une simulation correcte du pic de fonte nivale. L'augmentation de la résolution à 1 km permet un gain significatif en qualité, mais reste insuffisante. Pour obtenir de meilleurs résultats, il faudrait prendre en compte une variabilité sous-maille : répartition spatiale du manteau neigeux (transport de neige par le vent), influence du couvert forestier ou nappes de versant. Les études d'impact ont montré que « l'incertitude », ou plutôt la dispersion des résultats obtenus est grande, d'où l'intérêt de travailler sur l'amélioration des scénarios en entrée, comme déjà évoqué dans le paragraphe consacré au climat.

Au niveau de la prospective, c'est sur ce thème, porté principalement par l'équipe MC2 dans laquelle je travaille maintenant, que portera l'essentiel de mon travail de recherche. Il sera basé essentiellement sur l'outil SIM. Les axes de travail sont les suivants :

- *Le développement et l'amélioration de SIM* doivent se poursuivre. Si le système France est construit, la validation du système est probablement plus poussée sur les bassins versants du Rhône, de la Seine et de la Garonne que sur d'autres zones. Il sera nécessaire poursuivre les actions sur ce thème. Dans l'immédiat, une action est programmée (Stage master de Pere Quintana-Segui) sur la zone méditerranéenne. Cette zone est assez complexe du point de vue météorologique, des sols et du souterrain. On relève en effet de nombreuses précipitations convectives, des zones de montagne dont certaines à composante nivale, des sols assez secs, une végétation particulière et des systèmes karstiques. La prise en compte des rétroactions du souterrain (projet PNRH coordonné par Florence Habets), l'introduction de données de végétations observées, l'amélioration du forçage (analyse de précipitation à échelle fine par exemple) devrait aussi permettre l'amélioration du système. Une collaboration avec l'UMR Sysiphe en

discussion permettrait aussi d'améliorer le transfert en rivière. Du point de vue de la neige, il est probable que SnowMIP2 permette une amélioration du schéma de neige d'ISBA. De même, il faudra tester différentes versions d'ISBA dans ce système (diffusion de température, végétation interactive, ...).

- *Les études liées à l'assimilation* devraient devenir de plus en plus importantes dans les années à venir. La chaîne SIM calculant les bilans d'eau et d'énergie du sol, il sera possible d'utiliser ses résultats pour initialiser les modèles de mésoéchelle. L'intérêt est de pouvoir fournir à la fois contenu en eau du sol, gel éventuel et températures. L'autre problème qu'il faudra résoudre est l'extension spatiale limitée de SIM (la France plus la partie amont des bassins (Rhin, Rhône)) pour les modèles de prévision du temps. Enfin, il est aussi possible d'assimiler certaines données dans SIM. L'assimilation des débits permettrait d'avoir de meilleures conditions initiales dans le cadre des prévisions des crues.
- *Le potentiel de SIM pour la prévision des crues lentes* est également à évaluer. Fabienne Rousset (en thèse à GMME/MC2) est en train d'étudier ce point important. L'objectif est de prévoir les crues lentes des grands bassins à partir des prévisions d'ensemble du CEPMMT.
- *Dans le cadre des études d'impact climatique* sur l'hydrologie avec SIM, deux points méritent d'être développés.
Le premier concerne les entrées météorologiques. Il faudra s'investir sur les phénomènes extrêmes (sécheresses ou fortes précipitations). Ce sera le but du projet RIVAGES (déjà cité), qui devra proposer des méthodes de désagrégation des simulations climatiques rendant compte des variations des distributions des précipitations dans les scénarios. Le projet s'intéressera au bassin de la Seine, une zone probablement plus simple à simuler que le sud de la France.
Le deuxième consiste en la prise en compte du facteur humain et de l'aménagement dans les scénarios. Le récent projet GICC sur la Seine a montré que l'influence humaine sur l'hydrologie était parfois supérieure aux variations attendues du climat pour le XXI^e siècle. SIM est un outil très intéressant pour croiser les deux types d'impact. La thèse de Sophie Morel et l'étude faite pour l'Agence de l'eau Adour-Garonne ont montré qu'il était possible d'introduire des scénarios d'occupation du sol ou d'utilisation de l'eau dans SIM. Une poursuite de la collaboration avec l'Agence de l'eau et l'INRA devrait être discutée en 2005.
- *Enfin, il ne faut pas oublier la question des outils de la recherche.* L'équipe MC2 a fait un effort très important d'écriture d'une version externalisée de la surface. Ce code de surface contient actuellement ISBA (avec ses différentes versions), le module de ville TEB, et des paramétrisations pour les lacs et la mer. Ce code, comprenant également une filière d'initialisation est disponible depuis peu de temps. Il est utilisé aujourd'hui dans le modèle MésoNH, le prototype AROME et certaines applications en mode forcé. Il sera nécessaire dans les années à venir de fournir une aide aux différents utilisateurs internes et externes et de faire l'effort nécessaire pour que les applications utilisent ce nouveau code. Le couplage de cette surface avec le modèle ARPEGE-Climat permettra l'utilisation des améliorations du schéma pour la modélisation climatique.

6 Bibliographie

- Ancey C., Rapin F., Martin E., Coléou C., Naaim M., Brunot G. (2000) : L'avalanche de Pécclerey du 9 février 1999, *La Houille Blanche*, n°5/2000, 45-53.
- Boone A., Etchevers P. (2001) : An intercomparison of three snow schemes of varying complexity coupled to the same land surface model: local-scale evaluation at an Alpine site, *J. of Hydrometeorology*, 374-394.
- Boone, A., Noilhan J., Etchevers, P. (2000). GICC-Rhone Climate scenarios. Rapport de travail, CNRM. 55p
- Boone A., Habets, F., Noilhan J., Clark D., Dirmeyer P., Fox S., Gusev Y., Haddeland I., Koster R., Lohmann D., Mahanama, Mitchell K., Nasonova, O., Niu G.-Y., Pitman A., Polcher J., Shmakin A. B., Tanaka K., Van den Hurk, Vérant S., Verseggi D., Viterbo P., Yang Z.-L. (2004) : The Rhône-Aggregation Land Surface Scheme Intercomparison project: An Overview, *Journal of Climate*, **17**, 187-208.
- Bouilloud L. (2003) : Validation et amélioration du couplage d'un modèle de sol et d'un modèle de neige, rapport de stage du DEA climat et physico-chimie de l'atmosphère, Université Joseph Fourier, 67p.
- Bouilloud L., Martin E. (2004) : Validation du couplage ISBA/CROCUS dans le cadre du projet GELCRO (Prévision des caractéristiques de surface des chaussées en condition hivernale), *Actes des Ateliers de modélisation de l'atmosphère 2004*, 73-76.
- Bouilloud, L., Martin, E. (2005) : A coupled model to simulate snow behaviour on roads, submitted.
- Brun E., Martin E. Simon V., Gendre C., Coléou C. (1989) : An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, **35**, N°121, 333-342.
- Brun E., Martin E., Spiridonov V. (1997) : The coupling of a multi-layered snow model with a GCM, *Annals of Gaciology*, **25**, 66-72.
- Brun E., David P., sudul M., Brunot G. (1992) : A numerical model to simulate snow cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *J. Of Glaciol.*, **38**, N°128, 13-22.
- Choisnel E. (1988) : Estimation de l'évapotranspiration potentielle à partir des données météorologiques, *La Météorologie*, **7**(23), 19-27.
- Dang H, Genthon C, Martin E. (1997) : Numerical modelling of snow cover over polar ice sheets, *Annals of Gaciology*, **25**, 170-176.
- Déqué M., Marquet P. (1997) : Simulation of the impact of doubling the CO₂ concentration with T63C3.5 version of ARPEGE-Climat, Note de travail du GMGEC N°58.
- Déqué, M. et al (1998) : Final report for the project High resolution ten-year climate simulations (HYRETYCS), 252p.
- Douville H. (1995) : A new snow parametrization for the Meteo-France climate model. Part I : validation in stand-alone simulations. Part II : validation in a 3-D GCM experiment, *Clim. Dyn.*, **12**(1), 21-52.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciol.*, **18**, 65-71.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999) : A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, **45**, N 151, 469-484.

- Essery R., Martin E., Douville H., Fernandez A., Brun E. (1998) : A comparison of four snow models using observations from an alpine site, *Climate Dynamics* **15**, 583-593.
- Essery R., Etchevers P. (2004) : Parameter sensitivity in simulation of snowmelt, *Journal of Geophysical Research*, 109, D20111, doi:10.1029/2004JD005036.
- Etchevers P., Martin E., (1997) : Couplage ISBA Crocus : Validation locale au Col de Porte et application à un site de haute montagne, Note du Centre d'études de la Neige N°10.
- Etchevers, P. (2000) : Modélisation de la phase continentale du cycle de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, 361p.
- Etchevers P., Durand Y., Habets F., Martin E., Noilhan J. (2001) : Impact of spatial resolution on the hydrological simulation of the Durance high-Alpine catchment, France, *Annals of Glaciology*, **32**, 87-92.
- Etchevers P., Golaz C., Habets F. (2001) : Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin from 1981 to 1994, *Journal of Hydrology*, **244**, 60-85.
- Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J. (2002) : Impact of climate change on the Rhone river catchment hydrology, *Journal of Geophysical Research*, **107**, NO. D16, 10.1029/2001JD000490, 1-18.
- Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C., Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y.-J., Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova R., Pyles D., Schlosser A., B. Shmakin A., Smirnova T. G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L. (2002) : SnowMiP, an intercomparison of snow models : first results (2002), proceedings of the International snow science workshop, Penticton, Canada, 29 sep-4 oct 2002, 8 p.
- Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C., Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y.-J., Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova N. O., Pyles R. D., Schlosser A., B. Shmakin A., Smirnova T. G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L. (2003) : The SNOWMIP project : validation of albedo and short wave radiation budget simulated by several snow models, Edité par J. Côté, Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Report N°33, April 2003, WMO/TD – No 1219.
- Etchevers P., E. Martin, R. Brown, C. Fierz, Y. Lejeune, E. Bazile, A. Boone, Y.-J. Dai, R. Essery, A. Fernandez, Y. Gusev, R. Jordan, V. Koren, E. Kowalczyk, N. O. Nasonova, R. D. Pyles, A. Schlosser, A. B. Shmakin, T. G. Smirnova, U. Strasser, D. Verseghy, T. Yamazaki and Z.-L. Yang (2004) : Intercomparison of the surface energy budget simulated by several snow models (SNOWMIP project), *Annals. of Glaciology*, **38**, 150-158.
- Frémond, M., Williams, P., 1979: Gels des sols et des chaussées, Presse des Ponts et Chaussées.
- Genthon et al (1998) : Investigation and modelling of the physical characteristics and properties of snow at the surface of polar ice sheets, Final report of work for the Commission of the european communities under contract ENV4-CT95-0076.
- Giovinetto M. B., Waters N., Bentley C. (1990). Dependence of Antarctic surface mass balance on temperature, elevation and distance to open ocean. *Journal of Geophysical Research*, Vol 95, D4, 3517-3531
- Giraud G. (1993) : MEPRA: an expert system for avalanche risk forecasting. In *Armstrong, R., ed. ISSW'92. A merging of theory and practice. International Snow Science Workshop, 4-8 October 1992, Breckenridge, Colorado*, 97-104.
- Golaz C. (1999) : Modélisation hydrologique à l'échelle régionale appliquée a bassin du Rhône –comparaison de deux modes de calcul du bilan hydrique de de surface et étude de sensibilité à une perturbation des forçages atmosphériques, thèse de doctorat de l'Ecole nationale supérieure des Mines de Paris.

- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrère P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Ottlé C., Vidal-Madjar D. (1999a) : The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area Part I : model and database, *Journal of Hydrology*, 217, 75-96.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrère P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Ottlé C., Vidal-Madjar D. (1999b) : The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area, Part II : simulation of streamflow and annual water budget, *Journal of Hydrology*, 217, 97-118.
- Lassoued R. (2000) : Comportement hivernal des chaussées : modélisation thermique, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées.
- Latenser M., Schneebeli M., Föhn P., Amman W. (1997) : Climat, neige et avalanches, *Arguments de la recherche*, 13, Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 9-15.
- Lifen L., Robock A., Vinnikov K.Y., Schlosser C.A., Slater A.G., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Dickinson R.E., Dai Y.J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Henderson-Sellers A., Gedney N., Gusev Y., Habets F., Kim J., Kowalczyk E., Mitchell K., Nasonova O.N., Noilhan J., Pitman A.J., Schaake J., Schmakin A.B., Smirnova T.G., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.L., Zeng Q. (2002) : Effects of frozen soil temperature, spring infiltration, and runoff : results from the PILPS 2(d) experiment at Valdaï, Russia, *Journal of Hydrometeorology*, 4, 334-351.
- Martin E. (1988) : Etude expérimentale des flux de chaleur au-dessus de la neige, Mémoire de D.E.A, Université scientifique et médicale de Grenoble.
- Martin E., Brun E., Durand Y. (1994) : Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables, *Annales Geophysicae*, 12, 469-477.
- Martin E. (1995) : Modélisation de la climatologie nivale des Alpes françaises, application des techniques de régionalisation à l'étude de l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, 244p.
- Martin E., Durand Y., Lejeune Y., Giraud G., Mérindol L. (1996) : Validation de la chaîne SAFRAN/CROCUS sur les Pyrénées. Sensibilité aux variations du climat, Note du Centre d'études de la Neige N°7.
- Martin E., Lejeune Y., Leblois E., Collombet M., Valla F., Bironneau D., Ledoux E., Cavazzi C. (1996) : Etude hydrométéorologique du bassin de Sarennes : Présentation du projet et premiers résultats, *La Houille Blanche*, n°5/96, 66-70.
- Martin E., Timbal B., Brun E. (1997) : Downscaling of general circulation models outputs : simulation of the snow climatology of the French Alps. Sensitivity to climate changes, *Climate Dynamics*, 13, 45-56.
- Martin E., Lejeune Y., Leblois E., Valla F., Bironneau D. (1997) : Modélisation hydro-météorologique de l'aléa de crue pluvio-nivale. Rapport final de projet de recherche dans le cadre du contrat de plan entre l'Etat et la Région Rhône-Alpes (1994-1998).
- Martin E., Lejeune Y. (1998) : Investigations on turbulent fluxes above the snow surface, *Annals of Glaciology*, 26, 179-183.
- Martin E., Giraud G., Lejeune Y., Boudart G. 2001 : Impact of climate change on avalanche hazard. *Annals of Glaciology*, 32, 163, 167.
- Mingo L., Mc Clung D. (1998) : « CROCUS test results for snowpack modeling in two snow climates with respect to avalanche forecasting » *Annals of Glaciology*, 26, 347-356.
- Navarre J-P. : Modèle unidimensionnel d'évolution de la neige déposée. Modèle Perce Neige. *La Météorologie*, 4(3), 103-120.
- Noilhan J., Boone A., Etchevers P. (2001) : Application of climate change scenarios to the Rhone basin. Edité par S. Planton, C. Hanson, D. Viner and M. Hoepffner : Applying Climate Scenarios for Regional Studies with particular reference to the Mediterranean, Rapport No 4 ECLAT 2, Toulouse, 25-27 octobre 2000, 58- 74

- Obled Ch. (1971) : Modèle mathématique de fonte nivale, thèse de l'Université scientifique et médicale de Grenoble.
- Ottlé C., Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J., Martin E., Ledoux E., Leblois E., Sauquet E., Amraoui N., Artinian E., Champeaux J.L., Guérin C., Lacarrère P., Le Moigne P., Saulnier G.M., Vidal-Madjar D., Voirin S. (2001) : The French Rhone program : Coupled modelisation (surface atmosphere) of the water discharges, general presentation and objectives, *Physics and Chemistry of the Earth*, **26**(5-6), 443-453.
- Schlosser C.A., Slater A.G., Robock A., Pitman A.J., Vinnikov K.Y., Henderson-Sellers A., Speranskaya N.A., Mitchell K., Boone A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Desborough C.E., Dickinson R.E., Dai Y.J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schmakin A.B., Smirnova T.G., Verseghy D., Wetzel P., Xue Y. and Yang Z.L. (2000) : Simulation of a boreal grassland hydrology at Valdaï, Russia: PILPS Phase 2(d), *Monthly Weather Review*, **128**(2), 301–321.
- Poggi A. (1966) : L'évolution de la neige déposée à moyenne altitude. Thèse de doctorat de la faculté des sciences de l'Université de Grenoble, 38p.
- Savary S., Fortin J.P, Bernier M., Martin E. (2004) : Modélisation du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande dans le nord du Québec, à l'aide du modèle français CROCUS. *Revue des sciences de l'eau*, 17(3), 395-417.
- Slater A.G., Schlosser C.A., Desborough C. E., Pitman A.J., Henderson-Sellers A., Robock A., Vinnikov K., A., Braden H., Chen F., Cox P., de Rosnay P., Dickinson R.E., Dai Y.J., Duan Q., Entin J., Etchevers P., Gedney N., Gusev Y., Habets F., Kim J., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova O.N., Noilhan J., Schaake J., Schmakin A.B., Smirnova T.G., Verseghy D., Wetzel P., Xue Y., Yang Z.L., Zeng Q. (2001) : The representation of snow in land surface schemes : results from PILPS 2(d), *Journal of Hydrometeorology*, 2, 7-25.
- Viterbo P., Beljaars A.C.M. (1995) : An improved land surface parametrization scheme in the ECMWF model and its validation, Technical Report N° 75, ECMWF.

Publications et travaux scientifiques

1 Publications

1.1 Publications dans des revues à comité de lecture

1989

Brun E., Martin E. Simon V., Gendre C., Coléou C. (1989) : An energy and mass model of snow cover suitable for operational avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, **35**, N°121, 333-342.

1993

Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., Martin E. (1993) : A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciol.*, **18**, 65-71.

1994

Brun E., Durand Y., Martin E., Braun L. (1994) : Snow modelling as an efficient tool to simulate snow cover evolution at different spatial scales, *IAHS publication n° 223*, 163-176.

Braun L., Brun E., Durand Y., Martin E. Tourasse P (1994) : Simulation of discharge using different method of meteorological data distribution, basin discretization and snow modelling, *Nordic Hydrology*, **25**, NO 1/2, 129-144.

Martin E., Brun E., Durand Y. (1994) : Variabilité de l'enneigement et variation du climat, *La Météorologie*, **8**(5), mars 1994, 19-27.

Martin E., Brun E., Durand Y. (1994) : Sensitivity of the French Alps snow cover to the variation of climatic variables, *Annales Geophysicae*, **12**, 469-477.

1997

Brun E., Martin E., Spiridonov V. (1997) : The coupling of a multi-layered snow model with a GCM, *Annals of Glaciology*, **25**, 66-72.

Dang H, Genthon C, Martin E. (1997) : Numerical modelling of snow cover over polar ice sheets, *Annals of Glaciology*, **25**, 170-176.

Fierz C., Plüss C., Martin E. (1997) : Modelling the snow cover in a complex alpine topography, *Annals of Glaciology*, **25**, 312-316.

Martin E., Brun E., Durand Y. (1997) : Snow cover simulations in mountainous regions based on general circulation model outputs, *Annals of Glaciology*, **25**, 42-45.

Martin E., Timbal B., Brun E. (1997) : Downscaling of general circulation models outputs : simulation of the snow climatology of the French Alps. Sensitivity to climate changes, *Climate Dynamics*, **13**, 45-56.

1998

Lesaffre B., Pougatch E., Martin E. (1998) : Objective determination of snow-grain characteristics from images, *Annals of Glaciology*, **26**, 112-118.

Martin E., Lejeune Y. (1998) : Investigations on turbulent fluxes above the snow surface, *Annals of Glaciology*, **26**, 179-183.

1999

- David P., Martin E. (1999) : Le laboratoire du Col de Porte pour l'étude de la neige : histoire et climatologie, *La Météorologie*, **8**(28), décembre 99, 23-34.
- Durand Y., Giraud G., Brun E., Mérindol L., Martin E. (1999) : A computer-based system simulating snowpack structures as a tool for regional avalanche forecasting, *J. of Glaciol.*, **45**, 151, 469-484.
- Essery R., Martin E., Douville H., Fernandez A., Brun E. (1998) : A comparison of four snow models using observations from an alpine site, *Climate Dynamics* **15**, 583-593.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrère P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Ottlé C., Vidal-Madjar D. (1999) : The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area Part I : model and database, *Journal of Hydrology*, 217, 75-96.
- Habets F., Noilhan J., Golaz C., Goutorbe J. P., Lacarrère P., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Ottlé C., Vidal-Madjar D. (1999) : The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area, Part II : simulation of streamflow and annual water budget, *Journal of Hydrology*, 217, 97-118.
- Habets F., Etchevers P., Golaz C., Leblois E., Ledoux E., Martin E., Noilhan J., Ottlé C. (1999) : Simulation of the water budget and the river flows of the Rhone basin, *Journal of Geophysical research*, **104**, N° D24, 31145, 31172, December, 27.

2001

- Etchevers P., Durand Y., Habets F., Martin E., Noilhan J. (2001) : Impact of spatial resolution on the hydrological simulation of the Durance high-Alpine catchment, France, *Annals of Glaciology*, **32**, 87-92.
- Genthon C., Fily M., Martin E. (2001) : Numerical simulations of Greenland snow pack and comparison with passive microwave spectral signatures, *Annals of Glaciology*, **32**, 109, 115.
- Martin E., Giraud G., Lejeune Y., Boudart G. (2001) : Impact of climate change on avalanche hazard, *Annals of Glaciology*, **32**, 163, 167.
- Ottlé C., Etchevers P., Golaz C., Habets F., Noilhan J., Martin E., Ledoux E., Leblois E., Sauquet E., Amraoui N., Artinian E., Champeaux J.L., Guérin C., Lacarrère P., Le Moigne P., Saulnier G.M., Vidal-Madjar D., Voirin S. (2001) : The French Rhone program : Coupled modelisation (surface atmosphere) of the water discharges, general presentation and objectives, *Physics and Chemistry of the Earth*, **26**(5-6), 443-453.

2004

- Etchevers P., E. Martin, R. Brown, C. Fierz, Y. Lejeune, E. Bazile, A. Boone, Y.-J. Dai, R. Essery, A. Fernandez, Y. Gusev, R. Jordan, V. Koren, E. Kowalczyk, N. O. Nasonova, R. D. Pyles, A. Schlosser, A. B. Shmakin, T. G. Smirnova, U. Strasser, D. Versegny, T. Yamazaki and Z.-L. Yang (2004) : Intercomparison of the surface energy budget simulated by several snow models (SNOWMIP project), *Annals of Glaciology*, **38**, 150-158.
- Savary S., Fortin J.P., Bernier M., Martin E. (2004) : Modélisation du couvert nival, sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande dans le nord du Québec, à l'aide du modèle français CROCUS. *Revue des sciences de l'eau*, 17(3), 395-417.

1.2 Communication à des congrès (invitation)

1996

Martin E. (1996) : Validation for the alpine region using statistical downscaling, proceedings of the first HIRETYCS meeting, Toulouse, 19-20 June 1996, p37-42.

1998

Martin E. (1998) : SAFRAN/CROCUS : Meteorological analysis and snow monitoring in mountain regions, proceedings of the ECMWF workshop on modelling and data assimilation (29 juin-2juillet).

1999

Martin E. (1999) : Development of snow cover models, Conférence internationale sur les risques naturels en montagne, Grenoble 12-14 avril 1999.

2001

Martin E. et P. Etchevers (2001): Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale, les avalanches. « Variations climatiques et hydrologie », actes du colloque d'hydrotechnique, 169^{ième} session du Comité Scientifique et Technique, Paris, 12-13 décembre 2001.

1.3 Communication à des congrès (comité de sélection)

1994

Giraud G., Brun E., Durand Y., Martin E. (1994) : Validation of objective models to simulate snow cover stratigraphy and avalanche risk for operational avalanche forecasting. Proceedings of the International Snow Science Workshop, 30 oct-3 nov. 1994, Snowbird, Utah, USA, p509-517.

1995

Martin E., Brun E., Durand Y. (1995) : Evaluation de l'impact d'un changement du climat sur l'enneigement des Alpes françaises, dans *Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche, Actes du colloque* (Chamonix, 30 mai-3 juin 1995), Cemagref éditions, p347-352.

1997

Martin E., Lejeune Y., Leblois E., Valla F., Bironneau D., Armand M., Garçon R., Ledoux E. (1997) : Modélisation hydrologique du bassin de Sarennes, Ateliers de modélisation de l'atmosphère du CNRM, 2-3 décembre 1997, Toulouse.

Etchevers P., Habets F., Martin E., Noilhan J. (1997) : Validation du couplage ISBA/CROCUS dans le cadre de l'intercomparaison PILPS 2(d), Ateliers de modélisations du CNRM, 2-3 décembre 1997, Toulouse.

1998

Martin E. (1998) : SAFRAN/CROCUS : Meteorological analysis and snow monitoring in mountain regions, proceedings of the ECMWF workshop on modelling and data assimilation (29 juin-2juillet).

Essery R., Martin E., Douville H., Fernandez A., Brun E. (1998) : Intercomparaison de modèles de neige : premiers tests, projet SNOWMIP, Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 8-9 déc. 1998.

Martin E. (1998) : La chaîne SAFRAN/CROCUS/MEPRA, Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 8-9 déc. 1998.

Dang H., Fily M., Gay M., Genthon C., Martin E. (1998) : Le projet POLAR SNOW, Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 8-9 déc. 1998.

Lassoued R., Martin E., Frémond M., Dupas A. (1998) : Modélisation du comportement d'une couche de neige se déposant sur une chaussée, Ateliers de modélisation de l'atmosphère, 8-9 déc. 1998.

1999

Etchevers P., Noilhan J., Martin E. (1999) : Impact d'un changement climatique sur l'hydrologie du bassin versant du Rhône, Ateliers de modélisation de l'atmosphère. 30 novembre- 2 décembre 1999.

2002

Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C. Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y-J, Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova R., Pyles D., Schlosser A., B.Shmakina A., Smirnova T. G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L. (2002) : SnowMiP, an intercomparison of snow models : first results (2002), proceedings of the International snow science workshop, Penticton, Canada, 29 sep-4oct 2002, 8 p.

Giraud G., E. Martin, E. Brun et JP Navarre: CrocusMepra PC software : a tool for local simulations of snow cover stratigraphy and avalanche risks. Penticton, Canada, 29 sep-4oct 2002.

2004

Bouilloud L., Martin E. (2004) : Validation du couplage ISBA/CROCUS dans le cadre du projet GELCRO (Prévision des caractéristiques de surface des chaussées en condition hivernale), Actes des Ateliers de modélisation de l'atmosphère 2004, 73-76.

1.4 Contribution à des ouvrages collectifs

1995

Baumgartner M., Martin E., Borel J.-L (1995) : Climate change impacts on snow cover : modelling cases studies in Switzerland and the French Western Alps, Edité par Guisan et al. : Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian Mountains, Ed Conserv. Jard. Bot. Genève, 105-112.

1998

Martin E., Durand Y. (1998) : Precipitation and snow cover variability in the French Alps, Edité par John L. Innes et Martin Béniston : Lecture Notes in Earth sciences : The impact of climate variability on forests, Springer, 81-92.

2000

Brun, E., Martin, E., Durand, Y., Giraud, G., Lejeune, Y., Mérindol, M., Guyomarc'h, G., (2000) : Modélisation numérique du manteau neigeux –Application à la prévision du risque d'avalanche, à l'hydrologie et à l'étude du climat, Edité par Naaïm-Bouvet et al., La neige, Recherche et réglementation, Association française de génie civil, Cémagref, Presses de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées, 17-40.

2003

Etchevers P., Martin E., Brown R., Fierz C., Lejeune Y., Bazile E., Boone A., Dai Y.-J., Essery R., Fernandez A., Gusev Y., Jordan R., Koren V., Kowalczyk E., Nasonova N. O., Pyles R. D., Schlosser A., B.Shmakina A., Smirnova T. G., Strasser U., Verseghy D., Yamazaki T., Yang Z.-L. (2003) : The SNOWMIP project : validation of albedo and short wave radiation budget simulated by several snow models, Edité par

J. Côté, Research activities in atmospheric and oceanic modeling, Report N°33, April 2003, WMO/TD – No 1219.

2005

E. Martin, P. Etchevers (2005) : Impact of climatic changes on snow cover and snow hydrology in the French Alps, Edité par Huber U. et al., Global Change and Mountain Regions (a State of Knowledge Overview), Springer, 235-242.

1.5 Textes de vulgarisation ou valorisation

1993

Martin E., Brun E., Durand Y. (1993) : Effet de serre et enneigement, Neige et Avalanches, N°62, juin 93.

1995

Brun E., Martin E. (1995) : Modélisation du manteau neigeux à différentes échelles. Application au domaine des avalanches, de l'hydrologie et du climat, La Houille Blanche, N° 5/6-1995, 63-68.

Martin E., Brun E., Durand E. (1995) : Modélisation de la climatologie nivale des Alpes françaises et application aux études d'impact des changements du climat, La Houille Blanche, N° 7/8-1995.

1996

Dang H, Genthon C, Martin E. (1996) : Modélisation du manteau neigeux polaire, La Houille Blanche, n°5/96, 62-65.

Durand Y., Martin E., Mérindol Y. (1996) : Aide à la prévision du risque d'avalanche sur les Pyrénées, Neige et Avalanches N°75, 23-27.

Martin E. (1996) : Enneigement et variations du climat, Les cahiers Espaces : prospective et tourisme N°49, décembre 1996, Ed. ETE, 98-106.

Martin E., Lejeune Y., Leblois E., Collombet M., Valla F., Bironneau D., Ledoux E., Cavazzi C. (1996) : Etude hydrométéorologique du bassin de Sarennes : Présentation du projet et premiers résultats, La Houille Blanche, n°5/96, 66-70.

1997

Lesaffre B., Pougatch E., Martin E. (1997) : Détermination objective des caractéristiques des grains de neige à partir d'images, La Houille Blanche, n° 7/97, 76-82.

Brun E., Martin E., Spiridonov V. (1997) : Couplage d'un modèle de neige avec un modèle de climat, La Houille Blanche, n°7/97, 69-75.

1998

Martin E. (1998) : Enneigement et variations du climat, Neige et avalanches, N°83, septembre 1998, 14-17.

Martin E. (1998) : Modification de la couverture neigeuse, dans « Impacts potentiels du changement climatique en France au XXI^e siècle », Premier ministre, Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement (128p), 54-57.

Martin E. (1998) : Bilan énergétique du manteau neigeux, « Le guide neige et Avalanches », coordonné par C. Ancey (335p), 70-72.

2000

Ancey C., Rapin F., Martin E., Coléou C., Naaïm M., Brunot G. (2000) : L'avalanche de Péclerey du 9 février 1999, La Houille Blanche, n°5/2000, 45-53.

Brun E., Martin E., Durand Y., Giraud G., Lejeune Y., Mérindol L., Guyomarc'h G. (2000) : Modélisation numérique du manteau neigeux – Application à la prévision d'avalanches, à l'hydrologie et à l'étude du climat, dans La neige, Recherche et réglementation, Cemagref Editions et Presses de l'ENPC, 17-40.

2001

Martin E. (2001) : La neige va-t-elle disparaître de nos montagnes ? , La Montagne et Alpinisme, revue du Club alpin français, mars 2001.

Martin E., J. Villecroze, (2001) : Demain, des hivers sans neige ? , Montagne magazine, novembre 2001

2002

Martin E. and P. Etchevers (2002) : Impact des variations climatiques sur le manteau neigeux, incidence sur l'hydrologie nivale, les avalanches (Impact of climatic changes on snow cover, snow hydrology and avalanches), La Houille Blanche, N° 8-2002, p84-88.

2003

Martin E. (2003) : Les modèles, quelques réflexions, Neige et avalanches, revue de l'ANENA, N°104, décembre 2003, 34.

2005

Ancey C., Martin E. (2005) : La neige, La Recherche (rubrique Bac to Basis), N°383, février 2005, 73-76.

1.6 Mémoires ayant permis la soutenance de diplômes

1987

Martin E., Simon V. (1987) : Stage de fin d'études ENM : Validation d'un modèle d'évolution énergétique du manteau neigeux. Mémoire de fin d'études de l'Ecole nationale de la Météorologie, 164p.

1988

Martin E. (1988) : Etude expérimentale des flux de chaleur au-dessus de la neige, Mémoire de D.E.A, Université scientifique et médicale de Grenoble.

1992

Martin E. (1992) : Etude de la sensibilité du manteau neigeux aux variations possibles du climat : cas des Alpes françaises, Mémoire de D.E.A, Université Paul Sabatier, Toulouse.

1995

Martin E. (1995) : Modélisation de la climatologie nivale des Alpes françaises, application des techniques de régionalisation à l'étude de l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, 244p.

1.7 Rapports de fin de contrat

1995

Martin E. (1995) : Régionalisation des modèles de circulation générale : application à la simulation de l'enneigement dans les Alpes françaises. Rapport de fin d'études, contrat Eclat "Régionalisation des effets climatiques : modélisation et impact sur les éco-systèmes"

1996

Martin E. (1996) : Validation of the ECMWF Re-Analyses : Alpine validations with the snow model CROCUS. Rapport final sur la validation des réanalyses du CEPMMT, Juin 96, 57p

Martin E., Durand Y., Lejeune Y., Giraud G., Mérindol L. (1996) : Sensibilité de l'enneigement des Pyrénées aux variations du climat, comparaison avec le cas des Alpes". Rapport de fin d'études, contrat Eclat "Régionalisation des effets climatiques : modélisation et impact sur les éco-systèmes", 28p.

1997

Martin E., Lejeune Y., Leblois E., Valla F., Bironneau D. (1997) : Modélisation hydro-météorologique de l'aléa de crue pluvio-nivale. Rapport final de projet de recherche dans le cadre du contrat de plan entre l'Etat et la Région Rhône-Alpes (1994-1998).

1998

Déqué, M. et al (1998) : Final report for the project High resolution ten-year climate simulations (HYRETYCS), 252p.

Genthon et al (1998) : Investigation and modelling of the physical characteristics and properties of snow at the surface of polar ice sheets, Final report of work for the Commission of the European Communities under contract ENV4-CT95-0076.

2003

Martin E. (2003) : ERA40 : A forty year European re-analysis of the global atmosphere : validation with alpine snow, projet européen ERA40, 29p.

1.8 Notes du Centre d'études de la neige

1995

Lejeune Y., Martin E. (1995) : Application du modèle CROCUS aux données de la saison 93/94 du Col de Porte et de la campagne LEADDEX92. Note du Centre d'études de la Neige n°6, 55p

1996

Martin E., Durand Y., Lejeune Y., Giraud G., Mérindol L. (1996) : Validation de la chaîne SAFRAN/CROCUS sur les Pyrénées. Sensibilité aux variations du climat, Note du Centre d'études de la Neige N°7.

1997

David P., Martin E. (1997) : Le laboratoire du Col de Porte : historique et climatologie, Note du Centre d'études de la Neige N°9.

Etchevers P., Martin E., (1997) : Couplage ISBA Crocus : Validation locale au Col de Porte et application à un site de haute montagne, Note du Centre d'études de la Neige N°10.

Etchevers P., Habets F., Martin E., Noilhan J. (1998) : Résultat des simulations d'ISBA et de CROCUS dans la phase PILPS 2(d) : modélisation du manteau neigeux de Valdaï de 1966 à 1963, Note du Centre d'études de la neige N°11.

1998

Etchevers P., Douville H., Martin E. (1998) : Résultats du couplage ISBA/CROCUS dans l'expérience GSWP : simulation de la couverture neigeuse de l'hémisphère Nord, Note du Centre d'études de la neige N°12 (57p)

Etchevers P., Durand Y., Martin E. (1998) : Analyse SAFRAN des paramètres météorologiques de surface sur le bassin versant du Rhône de 1981 à 1994, Note du Centre d'études de la neige N°13, 56p.

2 Activités d'enseignement, encadrement et communauté scientifique

2.1 Enseignement

Cours de nivologie (10h par an) au DEA de Climat et physico-chimie de l'atmosphère, Université Joseph-Fourier (Grenoble), De 1999 à 2002.

2.2 Encadrement (thèses)

Pierre Etchevers : Modélisation de la phase continentale du cycle de l'eau à l'échelle régionale. Impact de la modélisation de la neige sur l'hydrologie du Rhône. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, soutenue le 27 janvier 2000, [Co-directeur de thèse, directeur de thèse Joël Noilhan, thèse UPS].

Katia Durot : Modélisation hydrologique distribué du bassin versant nivo-pluvial de Sarennes. Validation des données d'entrée et développement d'un module de fonte nivale sous forêt, soutenue le 25 octobre 1999, [Co directeur de Thèse, directeur de thèse Charles Obled, thèse INPG]

Thèse en cours

Ludovic Bouilloud, Prévion des caractéristiques de surface d'une chaussée en condition hivernale, [Directeur de thèse, thèse UPS débutée en novembre 2003].

2.3 Encadrement (autre)

Géraldine Boudard, Impact d'un changement climatique sur le risque d'avalanche dans les Alpes, stage d'approfondissement de l'Ecole nationale de la Météorologie, 1999. Co-encadrement avec Gérard Giraud.

Stéphane Savary. Modélisation et suivi complet du couvert nival sur le sous-bassin LG4 de la rivière La Grande, à l'aide du modèle français CROCUS, soutenu le 24 septembre 2002 (co-encadrement de stage de Mastère de sciences au Québec et président du jury)

2.4 Programmes de coopération

1994-1995	programme ECLAT 1 du Ministère de l'environnement (régionalisation des sorties de modèles de circulation numérique)
1994-1995	Validation des réanalyses du Centre européen (ERA15)
1995-1997	Programme ECLAT 2 du Ministère de l'environnement (chaîne Safran crocus mépra sur les Pyrénées)
1996-1997	Projet Sarennes. Contrat de plan Etat-région pour la recherche.
1996-1998	HIRETYCS : High resolution ten years climate simulations. Programme européen, 5ème PCRD
1996-1998	POLAR SNOW : modélisation de la neige polaire. Programme européen, 5ème PCRD

1998-1999	Programme GICC : Evaluation de l'impact d'un changement climatique sur l'activité avalancheuse
1998-2002	Programme Gelcro (comportement d'une couche de neige sur une chaussée), Direction des routes.
1999-2003	Programme GICC : Evaluation de l'impact d'un changement climatique sur le bassin du Rhône
2000-2003	Validation des réanalyses du Centre européen (ERA40)
2000-2003	SnowMIP : intercomparaison de modèles de neige (dans le cadre de l'ICSI et du PNRH)

2.5 Organisation de colloques/congrès, édition

Conférence internationale sur les risques naturels en montagne, Grenoble 12-14 avril 1999, organisateur de l'atelier avalanches.

International symposium on snow, avalanches and impact of the forest cover. Innsbruck, 22-26 mai 2000. Comité éditorial des Annals of Glaciology Vol. 32.

Changement climatique en montagne. Chamonix, 29-30 juin 2000, membre du comité scientifique.

Symposium on seasonal snow cover and atmosphere interactions, assemblée générale de IAMAS, Innsbruck, 11 juillet 2001. Convenor.

International symposium on snow and avalanches, Davos, 2-6 juin 2003. Comité éditorial des Annals of Glaciology, 38.

JWH01 Snow Processes : representation in atmospheric and hydrological models, IUGG General assembly, 2003 (co-convenor)

2.6 Participation à des jurys de thèse (hors des thèses encadrées)

Rey-Hanot L. (1999) : Adsorption de gaz traces sur la glace, Application à la chimie des nuages et du manteau neigeux. Soutenue le 30 avril 1999.

Lassoued R. (2000) : Comportement hivernal des chaussées : modélisation thermique, thèse de l'Ecole nationale des Ponts et chaussées.

Fortin G. (2003) : Conceptualisation des processus de formation, d'évolution et de désagrégation des couches de glace dans un couvert nival saisonnier, thèse de l'INRS-ETE, soutenue le 24 octobre 2003.

2.7 Animation scientifique

Responsable du groupe de travail SnowMIP (intercomparaison de modèles de neige) de l'ICSI (Commission internationale sur la neige et les glaciers) de 1999 à 2003.

Ce groupe de travail, suite d'un groupe de travail « Snow and climate », 1995-1999 a réuni 18 équipes de recherche et a permis de comparer 24 modèles sur 4 sites différents.

www.cnrm.meteo.fr/snowmip/.

Professeur invité à l'INRS-ETE (Institut national de la recherche scientifique- Eau, Terre, Environnement, Québec) de mai 2002 à mai 2005.

Cette nomination fait suite aux contacts entre le CEN et l'INRS-ETE, tout d'abord dans le cadre d'études sur le rayonnement, puis dans le cadre de la diffusion de CROCUS à la communauté scientifique. Ainsi, Guillaume Fortin, puis Stéphane Savary, en stage à l'INRS-eau ont utilisé CROCUS.

Participation au Conseil scientifique et technique du Pôle grenoblois d'études et de recherches sur les risques naturels.

L'activité du conseil est l'évaluation des projets soumis au Pôle grenoblois par les équipes adhérentes pour financement par le Conseil Général de l'Isère et des réunions sur des sujets en liaison avec les risques naturels.

Membre du comité de pilotage de la rédaction du guide méthodologique pour l'élaboration des Plans de prévention des risques avalanches. Guide rédigé par l'ONF, à l'initiative du MEDD.

Membre du groupe d'analyse et d'expertise scientifique mis en place par l'inspection générale de l'environnement, dans le cadre de sa mission concernant la crue du Rhône du 3 décembre 2003.

Participation à la rédaction du quatrième rapport d'évaluation du GIEC en tant que « lead author » pour le chapitre 12 (conséquences sur l'Europe), du groupe II

Sélection d'articles

Copie des articles suivants :

- Martin E., Timbal B., Brun E. (1997) : Downscaling of general circulation models outputs : simulation of the snow climatology of the French Alps. Sensitivity to climate changes, *Climate Dynamics*, **13**, 45-56.
- Martin E., Lejeune Y. (1998) : Investigations on turbulent fluxes above the snow surface, *Annals of Glaciology*, **26**, 179-183.
- Martin E., Durand Y. (1998) : Precipitation and snow cover variability in the French Alps, Edité par John L. Innes et Martin Béniston : *Lecture Notes in Earth sciences : The impact of climate variability on forests*, Springer, 81-92.
- Etchevers P. Durand Y., Habets F. Martin E., Noilhan J. (2001) : Impact of spatial resolution on the hydrological simulation of the Durance high-Alpine catchment, France, *Annals of Glaciology*, **32**, 87-92.
- Etchevers P., E. Martin, R. Brown, C. Fierz, Y. Lejeune, E. Bazile, A. Boone, Y.-J. Dai, R. Essery, A. Fernandez, Y. Gusev, R. Jordan, V. Koren, E. Kowalczyk, N. O. Nasonova, R. D. Pyles, A. Schlosser, A. B. Shmakin, T. G. Smirnova, U. Strasser, D. Verseghy, T. Yamazaki and Z.-L. Yang (2004) : Intercomparison of the surface energy budget simulated by several snow models (SNOWMIP project), *Annals. of Glaciology*, **38**, 150-158.